

PLASMA FOCUS HIGH-ENERGY PHOTON SOURCE WITH BLAST SHIELD

Patent number: JP2000346999
Publication date: 2000-12-15
Inventor: PARTLO WILLIAM N; FOMENKOV IGOR V; BIRX DANIEL L
Applicant: CYMER INC
Classification:
- international: G21K5/00; H05H1/24
- european:
Application number: JP20000118724 20000315
Priority number(s):

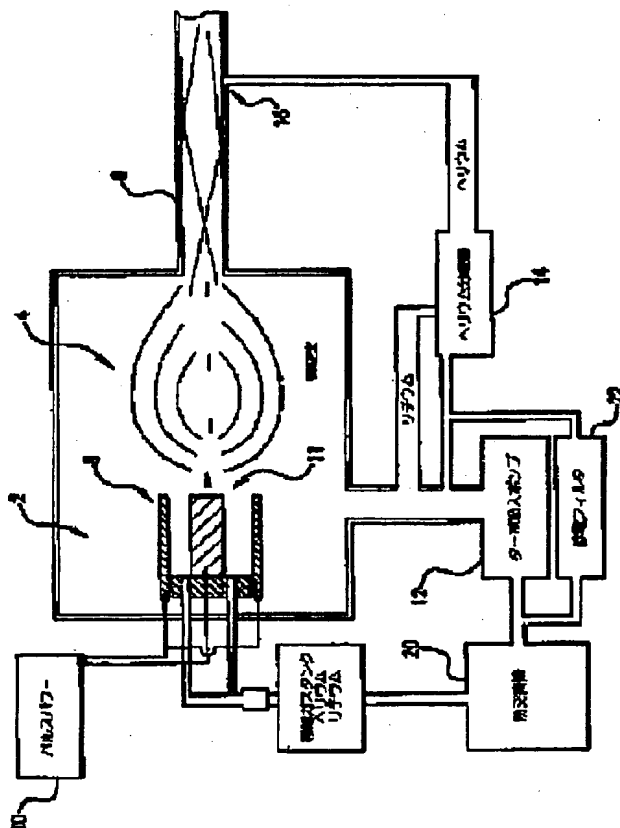
BEST AVAILABLE COPY

Report a data error here

Abstract of JP2000346999

PROBLEM TO BE SOLVED: To make it possible to avoid the generation of debris by supplying pulses whose voltage is high enough to discharge between a pair of electrodes from a pulse power source and limiting the extension of plasma pinch operation with a blast seal made of an electrically insulating material.

SOLUTION: A pair of electrodes 8 of a plasma pinch unit 2 are installed in a vacuum chamber including a function gas. A pulse power unit 10 supplies a high-voltage pulse that causes the sufficient discharge between the electrodes 8, produces spectral lines of an active gas in the function gas and generates plasma pinch of high temperature and density. A blast shield is put near a plasma focus position to limit the extension of plasma pinch in the axial direction. An outer face reflection control pointer 4 controls the radiation in a plasma focus and points it in a desired direction. The debris are collected by a conical nested debris collector. The performance of reflection of the outer face reflection control pointer 4 is maintained by keeping the temperature of the pointer 4 and the debris collectors at about 400 deg.C and vaporizing lithium in the active gas.



Data supplied from the esp@cenet database - Patent Abstracts of Japan

(11)特許出願公開番号

特開2000-346999

(P2000-346999A)

(43)公開日 平成12年12月15日(2000.12.15)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

FI

テーマコード* (参考)

G 2 1 K 5/00

G 2 1 K 5/00

$$Z$$

H05H 1/24

H05H 1/24

審査請求 有 請求項の数40 OL 外国語出願 (全 57 頁)

(21)出願番号 特願2000-118724(P2000-118724)

(22)出願日 平成12年3月15日(2000.3.15)

(31)優先権主張番号 09/268243

(32)優先日 平成11年3月15日(1999.3.15)

(33)優先権主張国 米国 (US)

(31)優先権主張番号 09/442582

(32)優先日 平成11年11月18日(1999.11.18)

(33)優先權主張国 米国 (US)

(71)出願人 597014361

サイマー インコーポレイテッド

アメリカ合衆国 カリフォルニア州

92127-1815 サン ディエゴ テクノロ

ジー ドライブ 16275

(72)発明者 ウィリアム エヌ パートロ

アメリカ合衆国 カリフォルニア州

92064 ポーウェイ ペドリザ ドライヴ
12634

(74) 代理人 100059959

弁理士 中村 稔 (外9名)

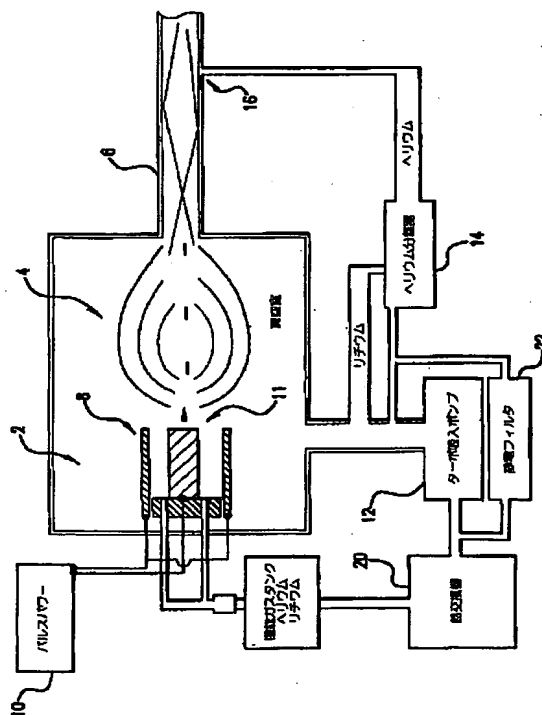
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 プラストシールドを備えるプラズマフォーカス高エネルギーフォトン源

(57) 【要約】

【目的】 本発明は高エネルギー光子源、特に高信頼性のx線及び高エネルギー紫外線源に関する。

【解決手段】 高エネルギー光子源。一対のプラズマフォーカス電極が真空室の中に設置される。該真空室は貴ガス及び所望のスペクトル線を持つべく選択された活性ガスを含む機能ガスを含む。パルスパワー源は、該活性ガスのスペクトル線を持つ放射を供給する該機能ガス中で、非常に高温高密度のプラズマフォーカスを產生する電極間に、放電を生じるのに十分な高電圧で電気パルスを供給する。該高密度絞り込みの位置のすぐ先に設置されたブラストシールドは、該絞り込みを限定してそれが軸方向に伸長するのを制限する物理的障壁を提供する。ブラストシールドには小さな開口が設けられ、それによって該放射が該シールドを通過することはできるが該プラズマは通過できない。好適な一実施態様では、プラズマに面する該シールドの表面はドーム型である。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 A. 真空室、

B. 前記真空室内に設置され、電気放電領域を規定し、かつ放電上の絞り込み部に高周波プラズマ絞り込みが生じるように配置された少なくとも2つの電極、

C. 少なくとも1つのスペクトル線を持つ光を供給するように選択された活性ガス、及び貴ガスである緩衝ガスを含む機能ガス、

D. 前記放電領域に機能ガスを供給する機能ガス供給システム、

E. 前記少なくとも1対の電極間に放電を生じさせるに十分な電気パルス及び高電圧を供給するパルス電源、及び

F. 前記プラズマ絞り込みの伸長を制限するように設置された電気絶縁物質からなるブラストシールドを有することを特徴とする高エネルギー光子源。

【請求項2】 前記ブラストシールドが、超紫外線光線が前記絞り込み部から前記ブラストシールドを通り抜けられるように設けられた孔を有することを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項3】 該光線の軸外での収集ができるように、前記孔が傘型になっていることを特徴とする請求項2に記載の高エネルギー光子源。

【請求項4】 さらに、前記プラズマ絞り込み部で発生された放射を収集し、かつ前記放射を所望の方向に向ける外面反射放射収集指向器を備えていることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項5】 さらに、該絞り込み部から該放射収集指向器へ伸び出ている光線と一直線に並んだ表面を持つ錐形入れ子式碎屑収集機を備えていることを特徴とする請求項4に記載の高エネルギー光子源。

【請求項6】 該錐形入れ子式碎屑収集機が該放射収集指向器の一部として組み立てられていることを特徴とする請求項5に記載の高エネルギー光子源。

【請求項7】 前記活性ガスは融点の明確な金属の蒸気であって、さらに前記放射収集指向器及び前記碎屑収集機を前記金属の融点を超える温度に維持する加熱手段を備えていることを特徴とする請求項5に記載の高エネルギー光子源。

【請求項8】 前記金属がリチウムであることを特徴とする請求項4に記載の高エネルギー光子源。

【請求項9】 前記パルス電源は、電気パルスを少なくとも1000ヘルツの周波数で供給するようにプログラムできることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項10】 前記活性ガスは材料の加熱によって生成されることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項11】 前記物質がリチウムであることを特徴とする請求項6に記載の高エネルギー光子源。

【請求項12】 前記リチウムが前記2つの電極の一方の中に設置されることを特徴とする請求項7に記載の高エネルギー光子源。

【請求項13】 前記2つの電極が軸線となる中央電極及び中央先端を規定するように同心円状に構成され、前記リチウムが前記軸線に沿って設置されていることを特徴とする請求項8に記載の高エネルギー光子源。

【請求項14】 さらに、前記リチウムを前記中央電極先端に対して調節する位置調節手段を備えたことを特徴とする請求項10に記載の高エネルギー光子源。

【請求項15】 前記活性ガスがリチウム蒸気であることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項16】 前記活性ガスがリチウム水素化物であることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項17】 さらに、前記収集指向器によって収集され方向付けられた放射を伝送するように配置された光伝送管を備えていることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項18】 前記電極がある電極物質からなり、前記収集指向器が同一の電極物質で被覆されていることを特徴とする請求項4に記載の高エネルギー光子源。

【請求項19】 前記電極物質がタングステンであることを特徴とする請求項18に記載の高エネルギー光子源。

【請求項20】 前記電極物質が銀であることを特徴とする請求項19に記載の高エネルギー光子源。

【請求項21】 前記緩衝ガスがヘリウムであることを特徴とする請求項18に記載の高エネルギー光子源。

【請求項22】 前記緩衝ガスがアルゴンであることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項23】 前記緩衝ガスがラドンであることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項24】 請求項1の高エネルギー光子源であって、前記少なくとも2つの電極が、作動中に内部電極と反対の極にある2つの外部電極と1つの内部電極をなした3つの円盤形電極であることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項25】 前記2つの電極が、軸線となる中央電極と、電極棒の配列からなる外部電極とを規定するように同軸に配置されていることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項26】 前記電極棒の配列が、概して円筒形を形成するように配置されていることを特徴とする請求項25に記載の高エネルギー光子源。

【請求項27】 前記電極棒の配列が、概して錐形を形成するように配置されていることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項28】 さらに、前記機能ガスをプレイオン化

するためのプレイオン化装置を備えていることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項29】 前記プレイオン化装置が直流火花ギャップイオン化装置であることを特徴とする請求項28に記載の高エネルギー光子源。

【請求項30】 前記プレイオン化装置が高周波駆動火花ギャップであることを特徴とする請求項28に記載の高エネルギー光子源。

【請求項31】 前記プレイオン化装置が高周波駆動表面放電であることを特徴とする請求項29に記載の高エネルギー光子源。

【請求項32】 前記プレイオン化装置がコロナ放電であることを特徴とする請求項29に記載の高エネルギー光子源。

【請求項33】 前記プレイオン化装置がスパイカー回路を備えていることを特徴とする請求項28に記載の高エネルギー光子源。

【請求項34】 さらに、超紫外線を透過し、可視光線を反射するための真空室窓を備えていることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項35】 前記窓が、厚さが1ミクロン以下の固体物質の薄片からなることを特徴とする請求項34に記載の高エネルギー光子源。

【請求項36】 前記物質が、ベリリウムとシリコンからなる物質群から選択されることを特徴とする請求項34に記載の高エネルギー光子源。

【請求項37】 さらに、前記放射を前記窓に集中させるためのフォーカス手段を備えていることを特徴とする請求項34に記載の高エネルギー光子源。

【請求項38】 さらに、超紫外線を透過し、可視光線を反射するためのビーム分割装置を備えていることを特徴とする請求項1に記載の高エネルギー光子源。

【請求項39】 前記窓が厚さが1ミクロン以下の固体物質の薄片からなることを特徴とする請求項38に記載の高エネルギー光子源。

【請求項40】 前記物質がベリリウム、ジルコニウム及びシリコンからなる物質群から選択されることを特徴とする請求項38に記載の高エネルギー光子源。

【発明の詳細な説明】

【0001】本出願は、1999年3月15日に出願された米国特許出願番号09/268243と現在は米国特許番号5,763,930である出願番号08/854507の一部継続出願である1998年6月8日に提出された米国特許出願番号09/093416との一部継続出願である1999年6月2日に提出された米国特許出願番号09/324526の一部継続出願である。

【0002】

【発明の属する技術分野】本発明は、高エネルギー光子源、特に高信頼性のx線及び高エネルギー紫外線源に関する。

【0003】

【従来の技術】半導体産業によってリソグラフィ技術は発展を続けており、該技術によりますます小寸法の集積回路がプリント可能になっている。これらのシステムは、高信頼性、費用効果的な処理能力及び適度の処理許容範囲を備えていなければならない。集積回路製造産業は、現在、水銀のG線(436ナノメートル)及びI線(365ナノメートル)露光源から248ナノメートル及び193ナノメートルのエキシマレーザ光子源へと変わりつつある。この変遷は、焦点深度の損失を最小にする高リソグラフィ分解能の必要によって促進されてきた。

【0004】集積回路産業の需要はやがて193ナノメートルの露光源の分解能を超え、193ナノメートルより遙かに短い波長の信頼性のある露光源の必要性を生じらるであろう。あるエキシマ線は157ナノメートルのところにあるが、この波長で十分な透過率を持ちかつ十分な光学性能を持つ光学材料は得難いのである。それ故に、全反射結像システムが必要となろう。全反射光学システムは透過システムより小さな開口数が求められる。該小開口数による分解能の損失は波長を大きく減少しなければ補償できない。したがって、光学リソグラフィの分解能を193ナノメートルまたは157ナノメートルで得られる分解能以上に改良しなければならないとすれば、10ナノメートルの範囲の光源が必要となる。

【0005】高エネルギー紫外線及びx線源の現在の技術的水準では、種々の標的物質にレーザビーム、電子その他の粒子を衝突させて作ったプラズマを利用している。固体標的が使用されてきたが、固体標的のアブレーションによって生じた碎屑が、流れ作業操業を意図したシステムの種々の部品に有害な結果をもたらす。碎屑問題で提案されている解決法に、凍結液体あるいは凍結ガス標的を使用して光学装置の表面に付着しないようにするものがある。しかし、これらのシステムのいずれも、流れ作業操業で実用できることは証明されていない。

【0006】x線及び高エネルギー紫外線が、プラズマ絞り込み操作で産生できることは久しく周知であった。プラズマ絞り込み部では、可能な幾つかの構成の一つ、例えば電流によって生じる磁場がプラズマ中の電子やイオンを加速して、イオンの外側の電子を殆どはぎ取り、その結果x線や高エネルギー紫外線を産生するのに十分なエネルギーを持った小容積に形成するような構成にして、電流をプラズマ中に通している。プラズマフォーカス、即ち、絞り込みによって高エネルギー放射を産生する種々の従来技術は、以下の特許で説明されている。

・ドーソン(J. M. Dawson)、「x線発生器」米国特許番号3,961,197、1976年6月1日
・ロバーツ(T. G. Roberts)ほか、「強力な、高エネルギー電子ビームを援用したx線発生器」米国特許番号3,969,628、1976年7月13日

・リー (J. H. Lee) 「内転サイクロイド絞り込みデバイス」米国特許番号4, 042, 848、1977年8月16日

・カーツ (L. Cartz) ほか、「レーザビームプラズマフォーカスx線システム」米国特許番号4, 504, 964、1985年3月12日

・ワイス (A. Weiss) ほか、「プラズマフォーカスx線装置」米国特許番号4, 536, 884、1985年8月20日

・イワマツ (S. Iwamatsu) 「x線源」米国特許番号4, 538, 291、1985年8月27日

・ハーツィガー (G. Herziger) 及びネフ (W. Neff) 「x線領域における高放射強度を持つプラズマ源の発生装置」米国特許番号4, 596, 030、1986年6月17日

・ワイス (A. Weiss) ほか、「x線リソグラフィシステム」米国特許番号4, 618, 971、1986年10月21日

・ワイス (A. Weiss) ほか、「プラズマフォーカスx線法」米国特許番号4, 633, 492、1986年12月30日

・オカダ (I. Okada) 及びサイトウ (Y. Saitoh) 「x線源及びx線リソグラフィ法」米国特許番号4, 635, 282、1987年1月6日

・グプタ (R. P. Gupta) ほか、「多真空アーク由来プラズマフォーカスx線源」米国特許番号4, 751, 723、1988年6月14日

・グプタ (R. P. Gupta) ほか、「ガス排出由来環状プラズマフォーカスx線源」米国特許番号4, 752, 946、1988年6月21日

・リオダン (J. C. Riordan) 及びペリマン (J. S. Peariman) 「x線源とともに用いるフィルター装置」米国特許番号4, 837, 794、1989年6月6日

・ネフ (W. Neff) ほか、「プラズマ源を使ってx線放射を発生するデバイス」米国特許番号5, 023, 897、1991年6月11日

・ハマー (D. A. Hammer) 及びカランター (D. H. Kalantar) 「x線絞り込みx線源を使うマイクロリソグラフィのための方法及び装置」米国特許番号5, 102, 776、1992年4月7日

・マックゲオック (M. W. McGeoch) 「プラズマx線源」米国特許番号5, 504, 795、1996年4月2日

・シュリーバー (G. Schriever) ほか、「光電子スペクトル分光のための狭帯域広域紫外線放射源としてのレーザ産生リチウムプラズマ」、応用光学第37巻第7部1243-1248頁、1998年9月

・レバート (R. Lebert) ほか、「超紫外線リソグラフィのための排出ガスに基づく放射源」、マイク

ロ及びナノエンジニアリングに関する国際会議、1998年9月

・パートロ (W. Partlo)、フォメンコフ (I. Fomenkov) 及びバークス (D. Birx) 「高密度プラズマフォーカスデバイスを使用した超紫外線 (13.5ナノメートル) 発生」、国際光学エンジニアリング協会 (SPIE) 会報、最新リソグラフィテクノロジーについてIII、3676巻、846-858頁、1999年3月

・シルファスト (W. T. Silfast) ほか、「超紫外線リソグラフィのための13.5ナノメートル及び11.4ナノメートルにおける高能力プラズマ排出源」、国際光学エンジニアリング協会 (SPIE) 会報、最新リソグラフィテクノロジーについてIII、3676巻、272-275頁、1999年3月

・ウー (F. Wu) ほか、「真空火花及び球状絞り込みx線/超紫外線点放射源」国際光学エンジニアリング協会 (SPIE) 会報、最新リソグラフィテクノロジーについてIII、3676巻、410-420頁、1999年3月

・パートロ (W. Partlo)、フォメンコフ (I. Fomenkov) 及びバークス (D. Birx) 「高密度プラズマフォーカス及びリチウム放出に基づく超紫外線リソグラフィのための13.5ナノメートルの特性記述」、超紫外線リソグラフィに関するセマティック (SEMATECH) 国際ワークショップ、1999年10月

【0007】一般的な従来技術のプラズマフォーカスデバイスでは、近x線リソグラフィに適した多量の放射を発生することができたが、パルスあたりの大きな電気エネルギーの要求と短命な内部部品のために反復速度が限られている。これらのシステムのための貯蔵電気エネルギーの要求量は、1キロジュールから10キロジュールの範囲にある。一般的に反復速度は秒あたり2-3回を超えなかった。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】必要なものは、高反復速度で動作し、碎屑形成に関連する従来技術の問題を回避する、高エネルギー紫外線及びx線放射を産生できる流れ作業用の信頼性のある簡単なシステムである。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は高エネルギーフォトン源を提供する。一対のプラズマ絞り込み電極が、真空室内に取り付けられている。該室は機能ガス内包しており、該ガスは所要のスペクトル線が得られるように選ばれた緩衝貴ガス及び活性ガスを含んでいる。パルスパワー源は、電極間に放電を生じるのに十分な高電圧の電気パルスを供給して、機能ガス中に活性ガスのスペクトル線で放射を供給する非常に高温高密度のプラズマ絞り込みを産生する。該高密度プラズマフォーカスが位置す

るすぐ向こうにおかれたブラストシールドが、物理的障害となって該絞り込みを制限してその軸方向の延伸を制限する。小さな開口がブラストシールドに設けられ、それを放射は通り抜けられるがプラズマは通り抜けられない。好適な一実施態様では、プラズマに向き合うシールドの表面はドーム型をしている。

【0010】好適な実施態様では、外面反射放射収集指向器がプラズマフォーカス内で生じた放射を収集し、該放射を所望の方向へ向ける。また、好適な実施態様では、活性ガスはリチウム蒸気であり、緩衝ガスはヘリウムであり、放射収集器は微小入射角に対し高い反射率を持つ物質でできているかコーティングされている。反射体材料として良好な物は、モリブデン、パラジウム、ルテニウム、ロジウム、金またはタングステンである。

【0011】他の好適な実施態様では、緩衝ガスはアルゴンであり、リチウムガスは同軸電極構造の中央電極の軸線に沿った孔に容れられた固体または液体のリチウムの蒸発によって発生させる。好適な実施例では、碎屑は、該絞り込み部から延伸して放射収集指向器へ向けられる光線と一直線にそろった表面を持つ円錐形の入れ子式碎屑収集器によって収集される。該入れ子式碎屑収集器及び該放射収集指向器は約400℃の範囲に保たれるが、この温度はリチウムの融解温度より高く、タングステンの融解温度より実質的に低い。タングステンとリチウム蒸気の双方とも該碎屑収集器上に収集されるが、該リチウムは該碎屑収集器及び収集指向器から蒸発し去り、他方該タングstenは該碎屑収集器上に永久的にとどまり、それゆえ集まって該放射収集指向器の反射性能を損なうことはない。該反射放射収集指向器及び該円錐形の入れ子式碎屑収集器は一つの部品として一緒に組み立てられることもできるし、或いはそれらは、互いに及び該絞り込み部と一直線に並んだ、別の部品とすることもできる。

【0012】超紫外線光は伝導するが可視光線を含む低エネルギー光線は反射する、独特の室内のぞき窓を備え付けることができる。この窓はシリコン、ジルコニウムまたはベリリウムのような物質からなる非常に薄い小口径の窓であることが望ましい。

【0013】出願人はここで、全ソリッドステートのパルスパワー駆動を採用した超紫外線(EUV)リソグラフィ用光源として、出願人及びその同僚作業者が製作した高密度プラズマフォーカス(DPF)プロトタイプ装置を説明する。シリコンフォトダイオードによる測定と組み合わせた、真空格子分光計から得た結果を利用し、出願人は、モリブデン/シリコン鏡の反射帯域内の放射の相当量が、2価にイオン化したリチウムの13.5ナノメートルの輝線スペクトルを利用して発生することができることを発見した。本プロトタイプ高密度プラズマフォーカス(DPF)は、パルスあたり25ジュールの蓄積電気エネルギーを、4πステラジアン中へ放出される約

0.76ジュールの帯域内13.5ナノメートル放射に変換する。このデバイスのパルス反復速度性能は、直流電源の限界の200ヘルツまで上がることが観察されてきた。この反復速度に至るまでに、パルスあたりの超紫外線出力の重大な落ち込みは観察されていない。200ヘルツでは、測定されたパルス間のエネルギー安定性は $\sigma = 6\%$ であり、パルスの欠落はみられない。本プロトタイプ高密度プラズマフォーカス(DPF)装置の電気回路及び作動は、安定性、効率及び性能の改善を意図した幾つかの好ましい変形実施態様の説明に沿って示されている。

【0014】本発明は、該モリブデン/シリコンまたはモリブデン/ベリリウム鏡システムの反射帯域によく一致した放出特性を備えた、信頼性のある高輝度超紫外線光源(EUV)中での超紫外線リソグラフィの実際の使用を提供するものである。この提案の全反射超紫外線(EUV)リソグラフィ装置は、スリット走査に基づくシステムであるから、本発明は高反復速度性能を備えた超紫外線(EUV)光源を提供するものである。

【0015】

【発明の実施の形態】(第一の好ましい実施態様)高エネルギー紫外線光源の簡単な図を図1に示す。主要な構成部品は、プラズマ絞り込みユニット2、高エネルギーフォトン収集器4、及び光伝送管6である。該プラズマ絞り込み光源は、低インダクタンス・パルスパワー回路10によって電力を供給される同軸電極8を有する。本好ましい実施態様中の該パルスパワー回路は、高電圧かつ十分なエネルギーの回路であり、1キロジュールないし2キロジュールの範囲で約5マイクロ秒のパルスを1,000ヘルツの速度で同軸電極8に供給することができる。

【0016】ヘリウム及びリチウム蒸気の混合物などの少量の機能ガスが、図1に示すように電極8の基部の近くに存在する。高電圧のパルスがかかるごとに、プレイオン化または自己降伏のいずれかによって、同軸電極8の内部及び外部電極間に電子雪崩降伏が起きる。緩衝ガス中で起きる該雪崩降伏過程で、該ガスがイオン化され、該電極基部で電極間に電導性プラズマを生じる。ひとたび電導性プラズマが生じれば、内部及び外部電極間に電流が流れる。本好ましい実施態様では、内部電極は高正電位であり、外部電極は地電位である。電流は内部電極から外部電極へと流れ、従って電子は中央へ向かって流れ、正イオンは中央から流れ出る。この電流の流れが磁場を発生し、それが流動する電荷担体を加速して同軸電極8の基部から遠ざける。

【0017】プラズマが中央電極の先端に到達すると、プラズマにかかる電界及び磁界の力が、該中央電極の中心線に沿いつつその先端のわずかな点10あたりの「焦点」にプラズマを絞り込んで、該プラズマの圧力と温度は急速に上昇し極度の高温、場合によっては太陽表面温度より遥かに高い温度に達する。該電極の寸法及び

該回路の全電気エネルギーは、好ましくはプラズマ中で所要の黒体温度を生じるように最適化される。13ナノメートル領域での放射を発生するためには、20ないし100電子ボルトを超える黒体温度が必要である。一般的には、特定の同軸構造の場合、温度は、電気パルスの電位の上昇に伴って上昇する。放射点の形は、軸線方向にはいくらか不規則で、半径方向にはほぼガウス型である。該光源の一般的な半径寸法は300ミクロンであり、長さはほぼ4ミリメートルである。

【0018】技術文書で説明される殆どの従来技術のプラズマフォーカスユニットでは、放射点は黒体にごく近似したスペクトルで全方向に放射を発する。機能ガス中のリチウムの目的は、放射点からの放射のスペクトルを狭めることである。

【0019】(リチウム蒸気) 2価にイオン化されたリチウムは、13.5ナノメートルで電子遷移を示し、ヘリウム緩衝ガス中で放射源原子として機能する。2価にイオン化されたリチウムは、二つの理由から優れた選択肢である。第一はリチウムの低融点と高蒸気圧である。放射点から放出されたリチウムが、真空室壁面及び収集光学機器の表面を単に180℃以上に熱するだけで、これらの表面に付着するのを防ぐことができるのである。そして気相のリチウムは、普通のターボ分子汲み上げ技術を使って、ヘリウム緩衝ガスとともに該真空室から汲み出すことができる。また、リチウムは、単にこれら2気体を冷やすことで該ヘリウムから容易に分離できる。13.5ナノメートルで良好な反射を行うためにコーティング材料が利用される。図8は公表されたモリブデン/シリコンの反射率と関連させてリチウムの放出ピークを示している。

【0020】リチウムを放射源原子として利用する第三の利点は、非イオン化リチウムは13.5ナノメートルの放射に対して低い吸収断面を持つことである。さらに、放射点から放出されたイオン化リチウムは、穏和な電界で容易に一掃できる。残余の非イオン化リチウムは、13.5ナノメートルの放射に対し殆ど無影響である。13ナノメートル領域で現在提唱されている最も一般的な放射源は、レーザで融除したキセノンの凍結ジェットである。このようなシステムは、キセノンの13ナノメートルでの吸収断面積が大きいので、次のパルスができる前に事実上すべての放出キセノンを捕獲しなければならない。

【0021】(放射収集器) 該放射点で産生された放射は、全4πステラジアン中へ均一に放出される。あるタイプの収集光学素子では、この放射を捕獲してリソグラフィ機器へと向ける必要がある。これまでに提案された13ナノメートルの光源は、多層電気絶縁被覆鏡に基づく収集光学素子を示唆していた。多層電気絶縁被覆鏡は、大角度の領域で高い収集効率を得るために用いられた。碎屑を生む放射源は、該絶縁鏡を被覆してその反射

率を低下させ、そのため該放射源から出る収集出力を弱めたであろう。好ましい本システムは、電極の浸食を受け、時間の経過とともに放射点の近傍に置かれたどのような絶縁鏡をも品質低下させたであろう。

【0022】13.5ナノメートルの紫外線の小さな入射角では高反射率を持つ幾つかの物質が、利用可能である。これらの幾つかに対するグラフが、図11に示されている。良好な選択肢には、モリブデン、ロジウム及びタングステンがある。収集器はこれらの材料で構成することができ、ニッケルのような基体構造物質に被覆としてそれらを塗布するのが好適である。この円錐部分は、取り外し可能なマンドレル上にニッケル電気メッキによって調えられる。

【0023】大きな円錐角を受容できる収集器を作るためには、幾つかの円錐部分を互いに他の内部に入れ子にすることができる。各円錐部分は、その部分の放射円錐を所望の方向へ向け変えるために、該放射を一回以上反射することができる。微小入射角での作動のための収集の設計をすれば、浸食された電極物質の堆積に最もよく耐える収集器を作ることになる。このような鏡のきわめて小さい入射角の反射率は、該鏡の表面の粗さに依存する。表面の粗さへの依存度は入射角が微小入射角に近づくにつれて減少する。我々は少なくとも25度の固定角を超えて放射される該13ナノメートルの放射を、収集して方向を定めることができると見積もっている。放射を光伝送管へと向ける好適な収集器を図1, 2, 及び3に示した。

【0024】(タングステン電極-収集器のタングステン被覆) 外面反射収集器の材料を選択する好適な方法は、収集器の被覆材料を電極物質と同一にすることである。タングステンは、電極としての性能と13ナノメートルでの屈折率が0.945であるという実際の性質とを示してきたので、有望な候補である。該電極及び該鏡被覆に同一物質を使えば、浸食された電極物質が該収集鏡の上を被覆する際、鏡の反射率の低下を最小化することができるのである。

【0025】(銀電極及び被覆) 銀もまた13ナノメートルで低い屈折率を持ち、かつ高い反復速度操作を可能とする高い熱伝導性を持つので、電極及び被覆として優れた選択肢である。

【0026】(円錐入れ子式碎屑収集器) 別の好適な実施態様では、収集指向器は、すべてのタングステン蒸気をそれが収集指向器に到着する前に集めてしまう碎屑収集器5によって、蒸発電極物質による汚染から保護される。図9はプラズマ絞り込みから生じる碎屑を集める円錐入れ子式碎屑収集器5を示す。碎屑収集器5は、該絞り込み部の中心から延伸して、収集指向器4に向けられる光線と一直線にそろった表面を持つ円錐入れ子式の部分からなっている。

【0027】集められた碎屑は、タングステン電極から

出た蒸発タングステン及び蒸発リチウムを含んでいる。該碎屑収集器は、放射収集指向器4に取り付けられているかまたはその一部である。収集器は双方ともニッケルメッキした基体からできている。該放射収集指向器4は、非常に高い反射率を持つようにモリブデンまたはロジウムで被覆される。好ましくは、双方の収集器とも約400℃に加熱されるが、この温度はリチウムの融点よりかなり高く、かつタングステンの融点より実質的に低い。リチウム蒸気もタングステン蒸気とともに碎屑収集器5の表面に集まるが、リチウムは蒸発して去り、該リチウムが収集指向器4に集まっても、その後すぐに蒸発し去る。ひとたび碎屑収集器5に集まったタングstenは、永久的にそこにとどまる。

【0028】図7は出願人が設計した収集器の光学的特徴を示す。該収集器は5つの入れ子式微小入射角パラボラ反射鏡で成り立っているが、5つの反射鏡のうち3つのみが示されている。内側の2つの反射鏡は図示されていない。この設計では収集角は0.4ステラジアンである。以下で検討するように、該収集器表面は被覆され、リチウムの堆積を防ぐために加熱される。この設計で並行ビームが産生される。図1, 3, 及び10に示すような他の好適な設計はビームを一点に集める。該収集器は、13.5ナノメートル波長領域で高い微小入射角反射率を持つ物質で被覆するべきである。2つのそのような物質はパラジウムとルテニウムである。

【0029】(光伝送管) 堆積物質をリソグラフィー機器の照明光学素子に近づけないことが重要である。したがって、光伝送管6は、この分離を一層確実にすることが望ましい。該光伝送管6は、その内部表面が外側へほぼ全反射するようになった中空の光伝送管である。基本的な収集光学素子は、収集された放射の円錐角を小さくして、中空光伝送管の受容角に合わせるように設計することができる。この概念は図1に示されている。図1に示すようにタングsten、銀あるいはリチウム原子は、中空光伝送管を流れる緩衝ガスに逆らって上流へと拡散するはずなので、リソグラフィー機器の絶縁鏡は電極碎屑から非常によく保護されよう。

【0030】(パルスパワーユニット) 好適なパルスパワーユニット10は、ソリッドステートトリガー及び米国特許5, 142, 166号に記載したパルスパワーユニットのような磁気スイッチ回路を使用したソリッドステート高周波高電圧パルスパワーユニットである。これらのユニットは高信頼性があり、数ヶ月かつ数十億パルスを経る間殆どメインテナンスなしに連続操作することができる。米国特許5, 142, 166号の教示を引用によりここに援用する。

【0031】図4はパルスパワーを供給する簡単な電気回路を示している。好適な実施例は、エキシマレーザに用いるコマンド共振充電供給型の直流電源40を含んでいる。C₀は既製のコンデンサのバンクであり、併合キ

ャパタンスが65マイクロファラデーであり、ピーキングコンデンサC₁もまた既製のコンデンサのバンクであり、併合キャパタンスが65マイクロファラデーである。可飽和インダクタ42は約1.5ナノファラデーの飽和励振インダクタンスを持つ。トリガー44は、絶縁ゲートバイポーラトランジスタである。ダイオード46とインダクタ48は、米国特許5, 729, 562号で説明するものに似たエネルギー回収回路を形成し、1パルスから出た反射電気エネルギーを次のパルスがくる前にC₀に蓄積する働きをする。

【0032】(システム—第1の好ましい実施態様) したがって、図1に図示するように、最初の好適な実施例で、ヘリウム及びリチウム蒸気の混合機能ガスは、同軸電極8中へ放出される。パルスパワーユニット10からの電気パルスは、十分な高温高压で高密度のプラズマフォーカスを作り出し、機能ガス中のリチウム原子を2価にイオン化して、波長約13.5ナノメートルの紫外線放射を産生する。

【0033】この光は、外面全反射収集器4に集められ、中空光伝送管6へ向けられ、そこで該光はさらにリソグラフィー機器(図示せず)へ向けられる。放電室1は、ターボ吸入ポンプ12で約4トルの真空に保たれる。機能ガス中のヘリウムガスのいくらかはヘリウム分離器14で分離され、図1の16に図示するように該光伝送管を清掃するのに用いられる。該光伝送管中のヘリウムの圧力は、好ましくは通常低圧もしくは真空に保たれるリソグラフィー機器の所要圧力と釣り合う。機能ガスの温度は、熱交換機20によって所望の温度に保たれ、該ガスは静電フィルター22によって清浄化される。該ガスは、図1に図示するように該同軸電極空間に放出される。

【0034】(プロトタイプユニット) 出願人及び同僚作業者によって製作されテストされたプロトタイプのプラズマ絞り込みユニットの図が、図5に示されている。主要素子はC₁コンデンサデック、C₀コンデンサデック、絶縁ゲートバイポーラトランジスタスイッチ、可飽和インダクタ42、真空容器3, 及び同軸電極8である。

【0035】(テスト結果) 図6は出願人が図5に図示する該ユニットで測定した典型パルス形を示す。出願人は、C₁の電圧C₁の電流及び13.5ナノメートルでの輝度を8マイクロ秒間にわたって記録した。この代表的パルスの全エネルギーは、約0.8ジュールであった。パルス幅は(半値全幅で)約280ナノ秒であった。降伏前のC₁の該電圧は1キロボルトより僅かに小さかった。この実施例のプロトタイプは、200ヘルツまでのパルス速度で操作可能である。200ヘルツでの平均帯域内13.5ナノメートル放射の測定値は、4πステラジアンで152ワットである。1シグマでのエネルギー安定性は、6%である。出願人は該エネルギーの3.2%

が、図1に図示する収集器4で有用な13.5ナノメートルビーム中へ向けることができると見積もっている。

【0036】(第二の好ましいプラズマ絞り込みユニット) 図2に第二の好適なプラズマ絞り込みユニットが示されている。このユニットは米国特許4,042,848号で説明されたプラズマフォーカスデバイスと似ている。このユニットは2つの外部円盤型電極30,32及び内部円盤型電極36を有している。該絞り込みは、特許4,042,848号で説明され図2で指摘されたように、3方向から形成される。該絞り込みは、電極の周辺近くから始まり、中央に向かって進み、そして図2の34に図示するように放射点が対称軸に沿い内部電極の中心に発現される。図1の実施例に関連して説明したように、放射は収集され方向付けられる。しかし、図2に図示するように放射を該ユニットの両側からでてくる2方向で捕獲することが可能である。さらに、絶縁鏡を点38に設置して、始め左へ反射された該放射の相当な割合を放射点を通して反射することも可能であろう。これは右側への放射を強めるはずである。

【0037】(第三の好ましい実施態様) 第三の好ましい実施態様は、図3を引用して説明できる。この実施態様は第一の好ましい実施態様に似ている。この実施態様では、しかし、緩衝ガスはアルゴンである。ヘリウムは、13ナノメートルの放射に対して比較的無影響であるという好ましい性質を持っているが、原子量が小さいという望ましくない性質を持っている。小原子量のため、我々は該システムを2ないし4トルの圧力環境で操作しなければならない。ヘリウムの小原子量の他の欠点は、電気的励振回路のタイミングに加速距離を合わせるために必要な電極の長さである。ヘリウムは軽いので、該励振回路を通る電流がピークに達すると同時にヘリウムが電極の先端から離れるように、電極を望ましいものより長くしなければならないのである。

【0038】アルゴンのようなより重い原子は、所与の圧力ではヘリウムより伝導性が低い、原子量が大きいためより低圧でも安定した絞り込みを作り出せる。アルゴンの低操作圧力は、アルゴンの吸収性向の増加を償ってあまりある。加えて、必要な電極の長さが、原子量の大きさのために減少する。短い電極は2つの理由で有利である。第一は短電極を使ったときに起きる回路インダクタンスの減少である。インダクタンスが小さければ励振回路が効率的になり、したがって必要な電気ポンプエネルギーを減少させられる。短電極の第二の利点は、電極の先端から基部までの熱伝導経路距離の減少である。電極に与える熱エネルギーの大部分は、先端で起こり、電極の伝導冷却は、主として基部で起きる(放射冷却もまた起きる)。短電極では、熱い先端から冷たい基部までの長さに沿った温度低下が小さくなる。パルスあたりのポンプエネルギーの小ささと改善された冷却経路の両方によって、該システムはより高い反復速度で動作する。反復

速度の増加は、直接に該システムの平均光学出力能力を増加させる。該出力能力を反復速度の増加で評価することは、パルスあたりのエネルギーの増加と対照して、リソグラフィ光源の平均出力能力の場合、最も望ましい方法である。

【0039】この好適な実施態様では、第一第二の実施態様と違ってリチウムを気相で真空室に注入しない。そのかわりに、図3に図示するように固体リチウムが中央電極の中心の孔に入れられる。電極から出る熱が、該リチウムを蒸発温度に上昇させる。該電極の熱い先端に対するリチウムの高さを調節することで、電極先端付近のリチウムの分圧を制御できる。これを行う好適な実施例が図3に示されている。該電極先端に対して該リチウム棒の先端を調節する機構が与えられている。同軸電極8の解放端が上に来て、融解リチウムが単に中央電極の先端付近でどろどろになっていればよいように、該システムを垂直に設置するのが望ましい。ビームは図5Aに示すように垂直方向にまっすぐに出る。(代替的方法是、リチウムが液体で加えられるように、該電極をリチウムの融点以上の温度に熱することである)。特定の反復速度に必要な速度で該液体を汲み上げるために、非常に低速な流体ポンプが利用できる。タングステンの押し棒を使って、液体リチウムを中央電極先端領域へ押し出すこともできる。

【0040】電極中央に通った孔は、別の重要な利点をもたらす。該プラズマの絞り込みは、中央電極の先端の中心付近に形成されるので、エネルギーの多くはこの領域で消散する。この点の付近の電極物質は、融除されて圧力容器内部の他の表面を機能阻害する。中央孔のある電極を採用すれば、浸食される物質が大いに減少する。加えて、出願人の実験は、この領域におけるリチウム蒸気の存在は、電極物質の浸食速度をさらに減少することを示している。蛇腹その他の適切なシール法を使用して、電極装置が真空室に入る場所の良好なシールを維持すべきである。固体リチウムを十分に備えた取り替え用電極は、容易かつ安価に製造でき、かつ該真空室内で容易に取り替えできる。

【0041】(真空室内小窓) 該絞り込み部は、超紫外線(EUV)から分離しなければならない大量の可視光線を発生する。また、窓は、リソグラフィ光学素子がリチウムやタングステンで汚染されないことを、加えて確実にするものが望ましい。本発明によって産生される超紫外線ビームは、固体によって非常によく吸収される。それゆえビームに窓を付けるのは困難な問題である。出願人が好適とする窓問題の解決法は、超紫外線(EUV)を通し、可視光線を反射する非常に薄い箔を使用することである。出願人が好適とする窓は、入射ビームの軸線と約10°の入射角で傾いたベリリウムの箔(約10ないし15ミクロン)である。この配置で殆ど全部の可視光線は反射され、約50ないし80%の超紫外線(EUV)は透

過する。もちろんこのような薄い窓はあまり強くない。したがって、出願人は非常に直径の小さいベリリウムの窓を使い、該ビームは該小窓を通して絞り込まれる。好ましくは該薄ベリリウム窓の直径は、約10ミリメートルである。該小窓の加熱を考慮しなければならず、高反復速度には特別の該窓冷却が必要である。設計によっては、この構成部品は、単にビーム分割装置として設計され、該薄光学素子を挟む圧力の差異がないので該設計は簡単になる。

【0042】図10はビーム9を厚さ0.5ミクロン、直径1ミリメートルのベリリウムの窓7を通して絞り込むために、収集器延長部4Aによって放射収集器4が延長される好適な実施態様を示す。

【0043】(プレイオン化) 出願人の実験では、プレイオン化なしでも良好な結果が得られるが、プレイオン化で性能が改善することが示された。図5に示す該プロトタイプユニットは、電極間のガスをプレイオン化する直流駆動火花ギャッププレイオン化装置を有する。出願人はこれらのエネルギー安定値を大いに改善し、かつ改善プレイオン化技術によって他の性能パラメータを改善できるであろう。プレイオン化は、エキシマレーザの性能を改善するために、出願人や他の人々によって使われるよく発達した技術である。好適なプレイオン化技術を含むのは

- 1) 直流駆動火花ギャップ
- 2) 高周波駆動火花ギャップ
- 3) 高周波駆動表面放電
- 4) コロナ放電
- 5) プレイオン化と組み合わせたスパイカー回路

これらの技術は、エキシマレーザに関する科学文献によく説明されており、かつよく知られている。

【0044】(ブラストシールド) 図5Bは、好適な実施態様においてプレイオン化をもたらし総計8個のスパークプラグ138のうち2個の位置を示している。この図は外部がステンレススチール、内部がタングステンでできた陰極111と陽極123とをも示している。絶縁体の被膜が陽極123を囲み、5ミルの厚いフィルム絶縁体125が陽極と陰極とを完全に分離している。図5Bの1ないし6は、放電の始まりから1.5マイクロ秒の後に図5B5で頂点に達した絞り込みに至る典型的なパルスの進行を示している。該放電の間にプラズマは、該陽極の先端方向へ、該プラズマを流れる電流によって生じるイオン及び電子に働くローレンス力によって加速される。図5Bの121に示す電極の先端に達するやいなや、半径方向の力のベクトルが該プラズマを高温に達するまでに圧縮加熱する。

【0045】ひとたび該プラズマが圧縮されると、そこにあつて該プラズマに働く軸方向の力が、特に図5B6に示すように、該プラズマ柱を引き伸ばす傾向がある。この引き延ばしが不安定性を招く。ひとたび該プラズマ

柱が軸線方向にある点を超えて成長すると、圧縮プラズマの領域にまたがる電圧降下が大きくなりすぎて、該陽極先端近傍の低圧ガスでは支えきれなくなる。アークオーバーが起す電流の多くまたは全部が、図5B6の破線で示すように該陽極先端付近の短い低密度ガス領域を通して流れる。このアークオーバーは、パルスの不安定性を生じ、相対的に早い電極浸食を引き起こすので有害である。

【0046】この問題の解決法は、軸線方向の該プラズマ柱の動きに物理的障壁を作ることである。その様な障壁が、図5Cに素子番号143として示されており、PDFデバイスのプラズマ浪費に対する防御物として働くので、出願人によってブラストシールドと呼ばれる。該ブラストシールドは、強い機械的及び耐熱性を持つ電氣的絶縁性を持つ物質で作らなければならない。加えて、リチウムのような高反応性元素とともに操作するときには、該ブラストシールド材料の化学的適合性を考慮しなければならない。リチウムは、この超紫外線(EUV)源としてその13.5ナノメートルでの強い放出によって、放出要素として提唱されている。優れた候補物質は、単一結晶アルミナ、サファイアまたはジェネラルエレクトリック社によって製造され、商標のある物質ルカルクス(Lucalux)のようなアモルフォスサファイアである。

【0047】ブラストシールドの最適の形は、図5Cに示すような、該電極の直径と同じ半径を持ち、該電極上に中心があるドームであることが解った。その様な形は、プラズマの圧縮が最大の時、自然に起きるプラズマ流の線と密接に一致している。もし、該ブラストシールドが、該陽極の先端からさらに遠くはなされていたら、プラズマ柱は長すぎてプラズマ加熱が不十分になり、アークオーバーの危険が生じてこよう。もし、該ブラストシールドの位置が該陽極先端に近すぎると、電流の中央軸線から陰極への流れが制限され、やはりプラズマの加熱が不十分になろう。ブラストシールド143の上側の点144に、超紫外線(EUV)放射を逃がし、利用するために集めることができる孔が必要である。この孔は、該プラズマがこの孔から脱出して該ブラストシールド上に長く細い柱を形成する性質を帯びるように、できるだけ小さくしなければならない。点144で示すこの孔への傘型切り込みは、プラズマフォーカスデバイスで産生する超紫外線(EUV)の軸線外収集が大きくなる。

【0048】図5C1ないし6は、ブラストシールドが該プラズマ絞り込みを包含し、アークオーバーを防ぐ様子を示す。

【0049】上記の実施態様は、本発明の原理の適用例を示し得る多くの可能な特定の実施態様のほんの2、3に過ぎないことが理解できよう。例えば、機能ガスを再循環する代わりに、単にリチウムを捕捉してヘリウムを放出する方が望ましいこともある。タングステンと銀で

はなく、他の電極と被覆の組み合わせの使用も可能である。例えば、銅か白金の電極や被覆も利用可能であろう。該プラズマ絞り込みを発生する他の技術が、説明した特定の実施態様に代えて使用できよう。これら他の技術のうちあるものは、本明細書の従来の技術の部で引用した特許に記載されており、これらの記載はすべて引用としてここに援用される。多くの高周波高圧の電気パルスの発生法が、入手可能であり、使用できる。光伝送管を室温に保ち、該リチウム及びタングステンが光伝送管の全長を通過しようとする時、凝結させて取り出すのも代替手段となろう。さらに、この凝結取りだしの考え方は、原子が光伝送管壁への衝撃で永久的に付着するので、リソグラフィー機器に使われる光学部品に届く碎屑の量を減少させるであろう。リソグラフィー機器光学素子上への電極物質の堆積は、該収集光学素子を、放射点を第一放電室の小さな孔を通して再結像させ、作動ポンプ設備を使用するように設計することにより避けることができる。ヘリウムやアルゴンは、第二室から該開口を通して第一室へ供給することができる。この機構は、銅蒸気レーザの出力窓への物質堆積を防ぐのに効果的であることが示されてきた。リチウムの代わりにリチウム水素化物を使用することができる。該ユニットは、該電極を通して流れる該機能ガスを使用しない、静的充填システムを使用しても機能するであろう。言うまでもなく、単一パルスから秒あたり5パルスないし数百数千パルスまで広い範囲にわたる反復速度が可能である。必要であれば、固体リチウムの位置を調節する調節機構は、該中央電極の先端の位置が該先端の浸食を考慮して調節可能となるように修正することも可能であろう。

【0050】上記で説明した以外にも、多くの電極配置が可能である。例えば、外側電極は図示するような円筒形でなく、該絞り込み側の直径が大きい円錐形とすることができる。また、実施態様によっては、該内部電極を外部電極の先端を超えるように突出させれば性能が改善されることがある。これはスパークプラグその他該技術で周知のプレイオン化装置で可能になろう。他の好ましい実施態様では、該外側電極の代わりに一般的に円筒形または円錐形を形成するように配置した電極棒の使用がある。この方法は、結果的に生じるインダクションがプラストの役目をするので、電極軸線に沿って中心軸のある対称形の絞り込み部を維持するのに役立つ。

【0051】したがって、読者は該発明の範囲を、所与の態様によらず、添付する請求項及びその法的均等物によって決定することが必要である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の好適な実施態様を示す高エネルギーフォトン源の図である。

【図2】円盤形電極を持つ三次元プラズマ絞り込み装置の図である。

【図3】本発明の第三の好適な実施態様の図である。

【図4】本発明の好適な実施態様に対する好適な回路図である。

【図5A】出願人及びその同僚作業者が製作したプロトタイプユニットの図である。

【図5B】スパークプラグ式プレイオン化装置を備えたプロトタイプの電極を示す断面図である。

【図5B1】プラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5B2】プラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5B3】プラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5B4】プラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5B5】プラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5B6】プラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5C】ブラストシールドを付加した電極領域の断面図を示す。

【図5C1】適切にブラストシールドを付加したプラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5C2】適切にブラストシールドを付加したプラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5C3】適切にブラストシールドを付加したプラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5C4】適切にブラストシールドを付加したプラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5C5】適切にブラストシールドを付加したプラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図5C6】適切にブラストシールドを付加したプラズマフォーカスの成長を示す図である。

【図6】プロトタイプユニットで産生されたプラズマの形である。

【図7】双曲線形収集器によって生じた超紫外線（EUV）ビームの一部を示す。

【図8】モリブデンシリコン被覆の反射率に対する13.5ナノメートルにおけるリチウムのピークを示す。

【図9】入れ子式円錐形碎屑収集器を示す。

【図10】可視光線を反射し超紫外線（EUV）を透過する薄いベリリウム窓を示す。

【図11】13.5ナノメートルの紫外線放射に対する種々の物質の反射率を示すグラフである。

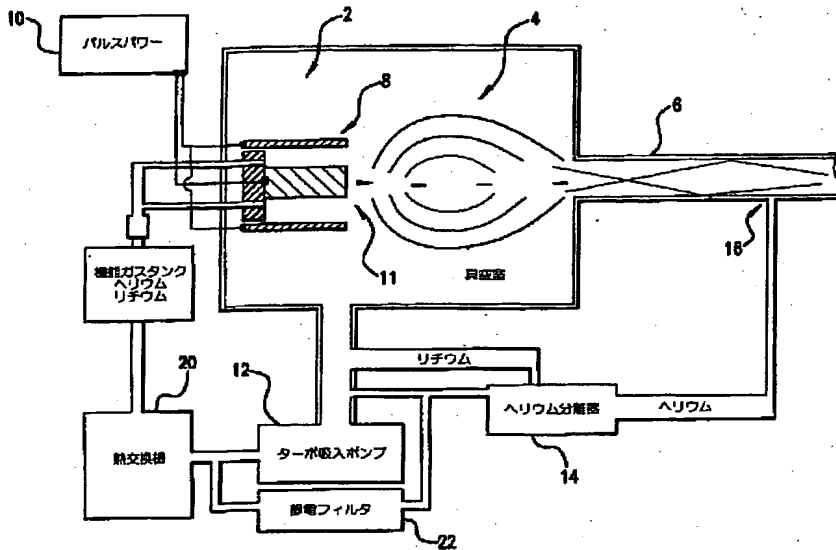
【符号の説明】

- 2 絞り込みユニット
- 4 高エネルギーフォトン収集器
- 6 光伝送管
- 8 同軸電極
- 10 パルスパワーユニット
- 12 ターボ吸入ポンプ

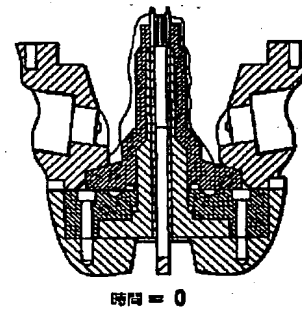
14 ヘリウム分離器
20 熱交換機

22 静電フィルタ

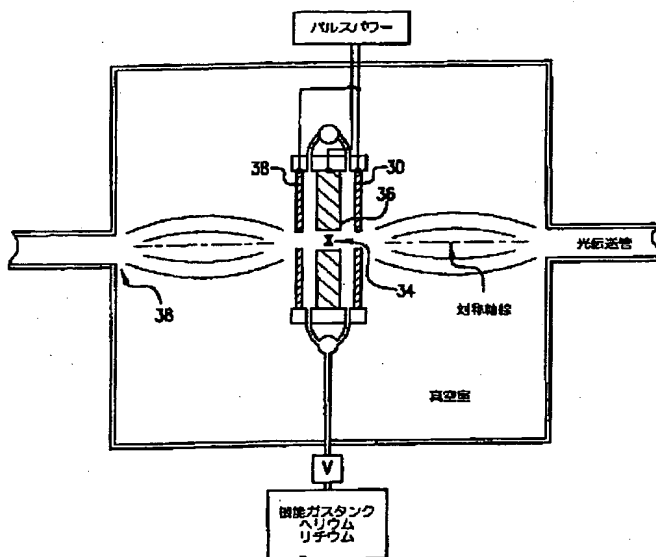
【図1】



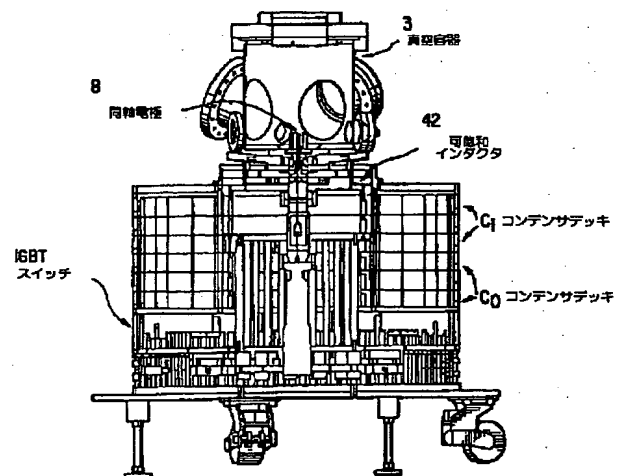
【図5B1】



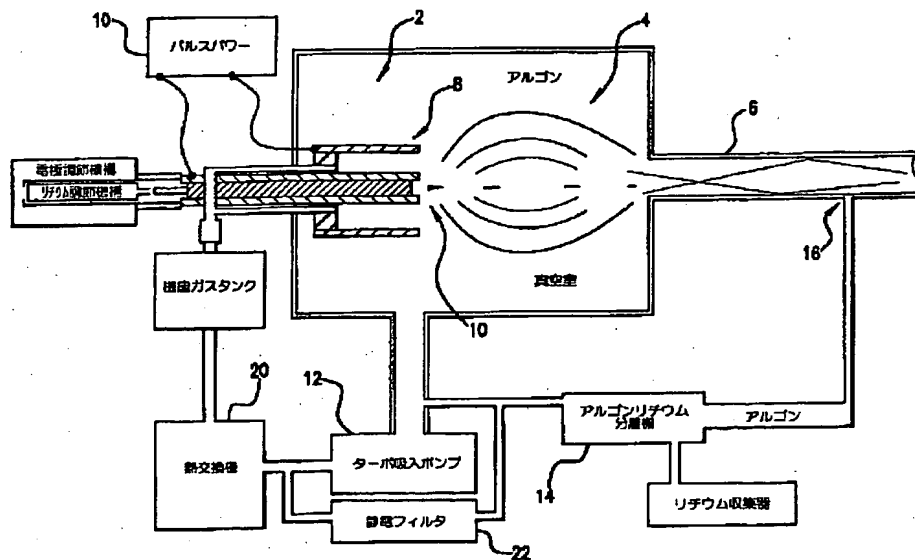
【図2】



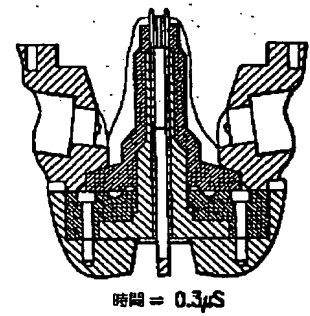
【図5A】



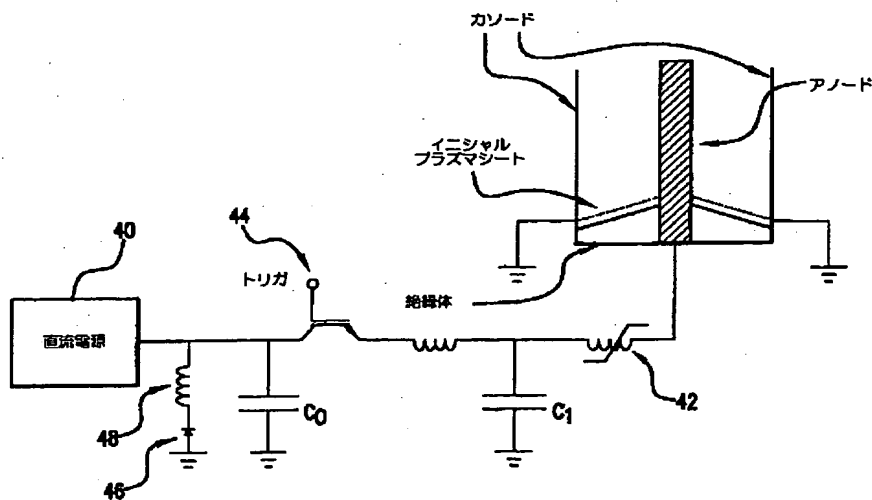
【図3】



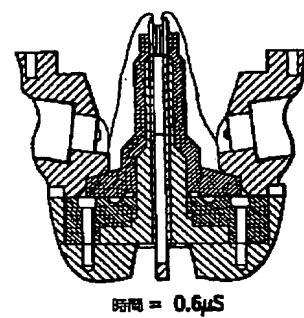
【図5B2】



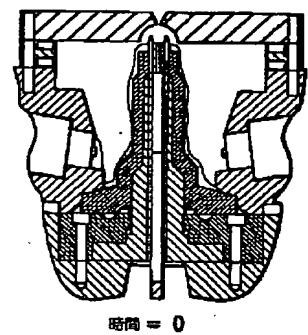
【図4】



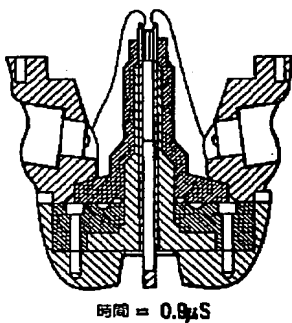
【図5B3】



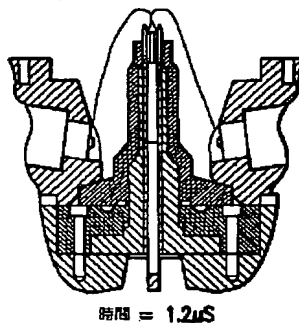
【図5C1】



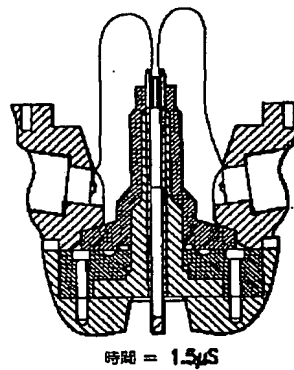
【図5B4】



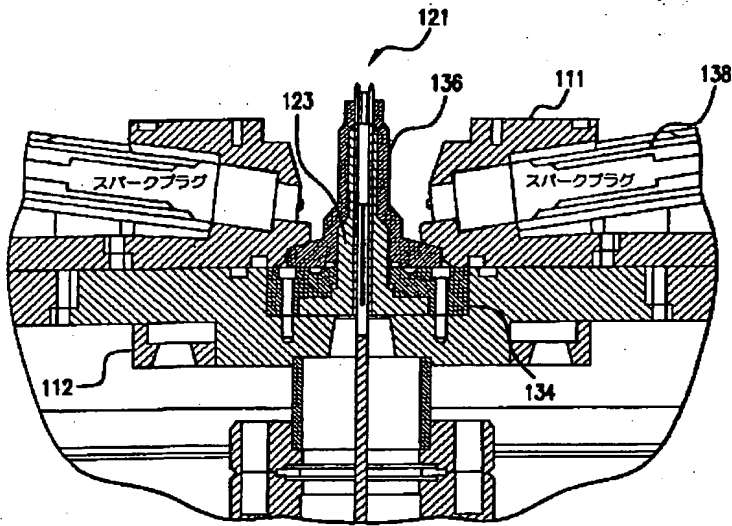
【図5B5】



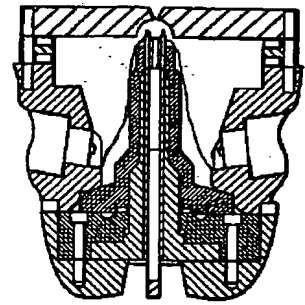
【図5B6】



【図5B】

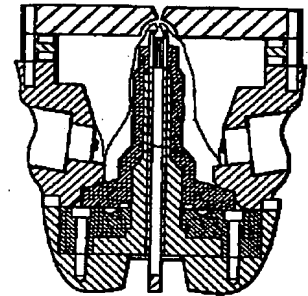


【図5C2】



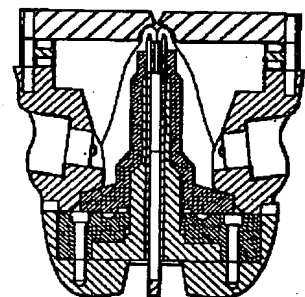
時間 = 0.3μS

【図5C3】



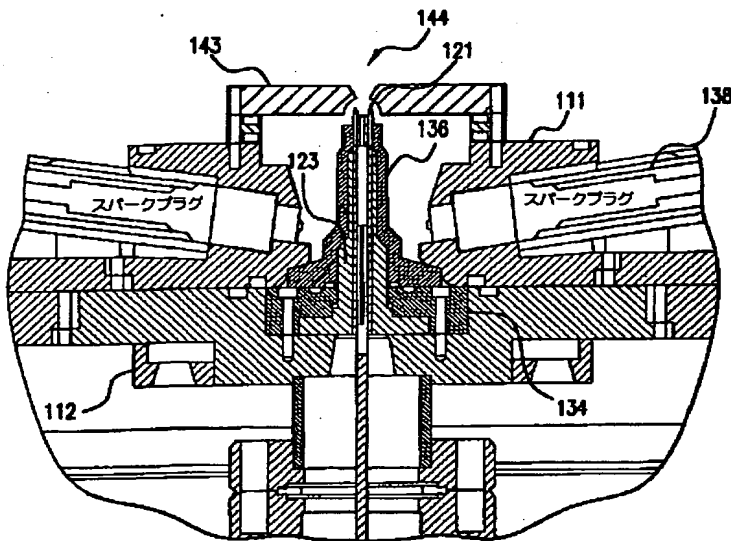
時間 = 0.6μS

【図5C5】

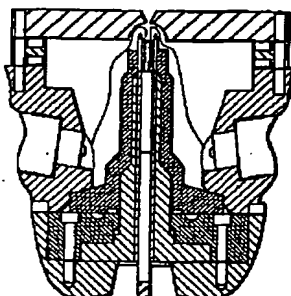


時間 = 1.2μS

【図5C】

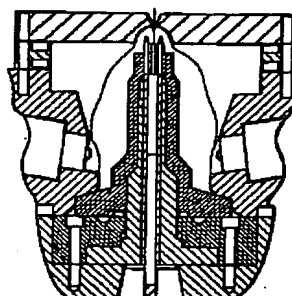


【図5C4】



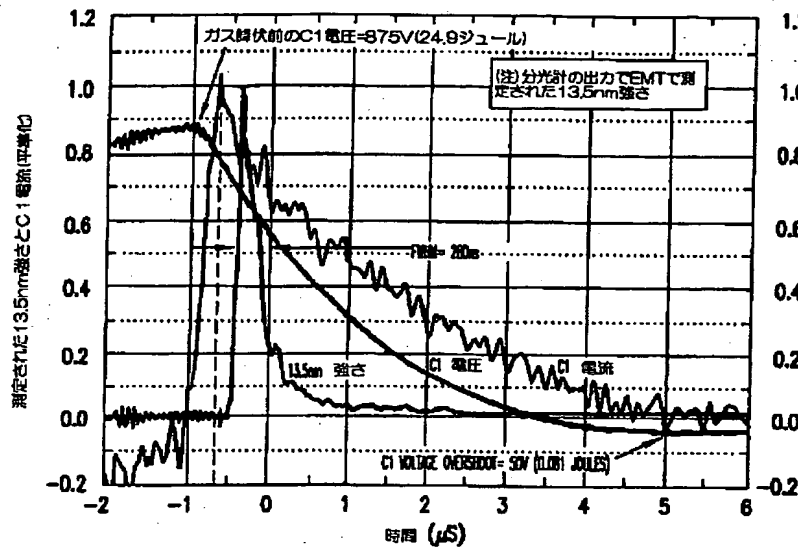
時間 = 0.9μS

【図5C6】

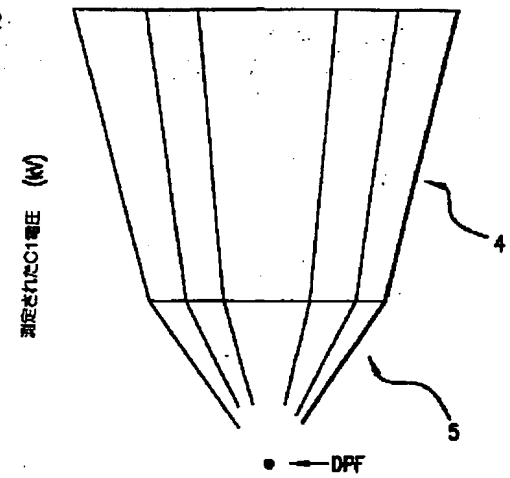


時間 = 1.5μS

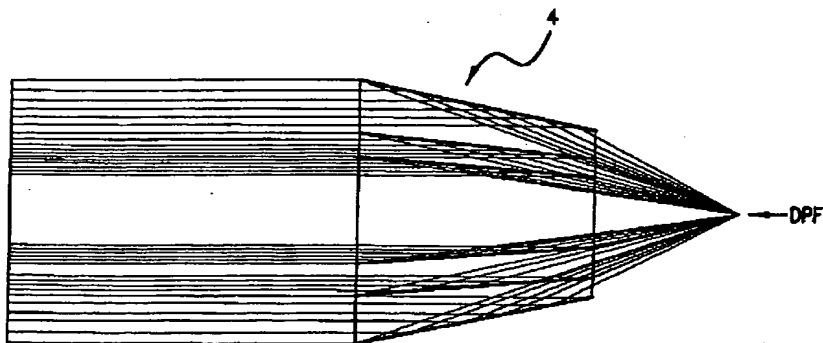
【図6】



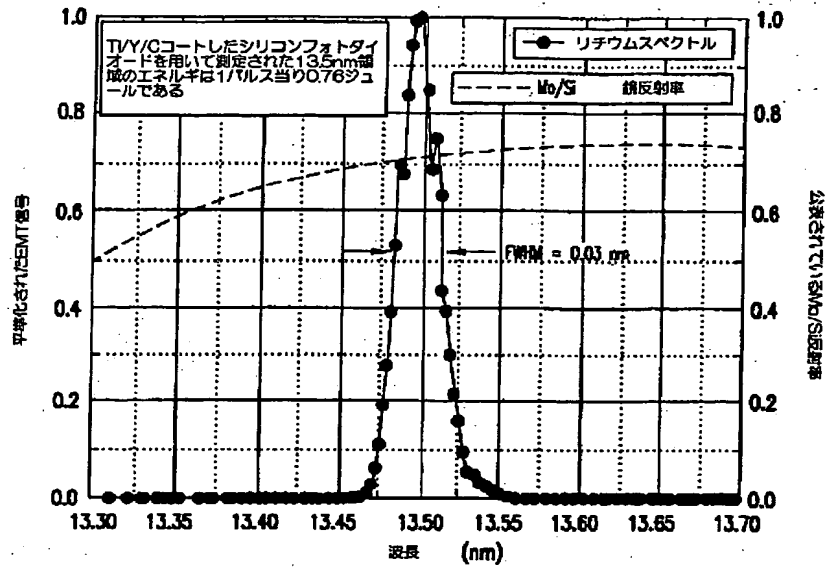
【図9】



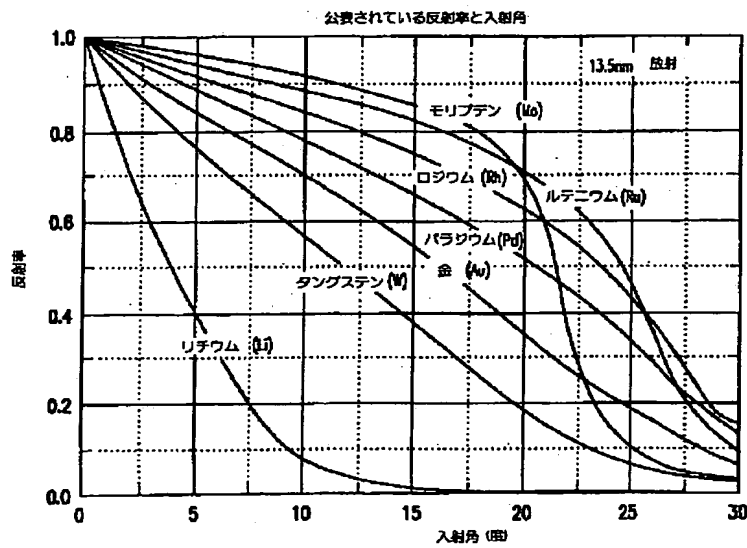
【図7】



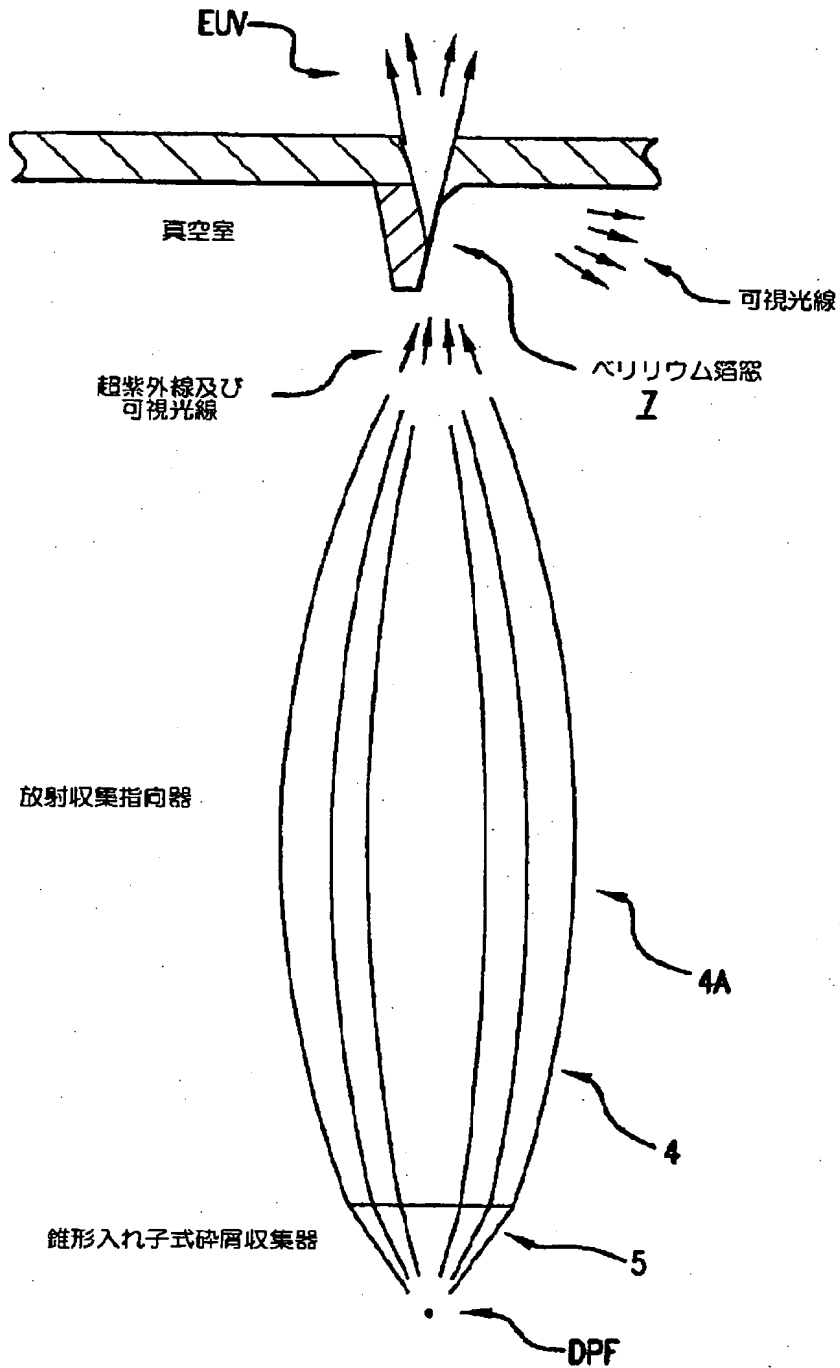
【図8】



【図11】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者 イーゴル ヴィー フォメンコフ
アメリカ合衆国 カリフォルニア州
92129 サン ディエゴ ジャーナル ウ
エイ 14390

(72)発明者 ダニエル エル バークス
アメリカ合衆国 カリフォルニア州
94561 オークリー ルート 175ディー
クリスモア レーン 3300

【 外国語明細書 】

**PLASMA FOCUS HIGH ENERGY PHOTON SOURCE WITH BLAST
SHIELD**

This application is a continuation-in-part of U.S. Serial No. 09/324,526, filed June 2, 1999 which was a continuation-in-part of U.S. Serial No. 09/268,243 filed March 15, 1999 and U.S. Serial No. 09/093,416, filed June 8, 1998 which was a CIP of Serial No. 08/854,507 which is now U.S. Patent No. 5,763,930. This invention relates to high energy photon sources and in particular highly reliable x-ray and high energy ultraviolet sources.

BACKGROUND OF THE INVENTION

The semiconductor industry continues to develop lithographic technologies which can print ever smaller integrated circuit dimensions. These systems must have high reliability, cost effective throughput, and reasonable process latitude. The integrated circuit fabrication industry is presently changing over from mercury G-line (436 nm) and I-line (365 nm) exposure sources to 248 nm and 193nm excimer laser sources. This transition was precipitated by the need for higher lithographic resolution with minimum loss in depth-of-focus.

The demands of the integrated circuit industry will soon exceed the resolution capabilities of 193nm exposure sources, thus creating a need for a reliable exposure source at a wavelength significantly shorter than 193nm. An excimer line exists at 157nm, but optical materials with sufficient transmission at this wavelength and sufficiently high optical quality are difficult to obtain. Therefore, all-reflective imaging systems may be required. An all reflective optical system requires a smaller numerical aperture than the transmissive systems. The loss in resolution caused by the smaller NA can only be made up by reducing the wavelength by a large factor. Thus, a light source in the range of 10nm is required if the resolution of optical lithography is to be improved beyond that achieved with 193 nm or 157 nm.

The present state of the art in high energy ultraviolet and x-ray sources utilizes plasmas produced by bombarding various target materials with laser beams, electrons or other particles. Solid targets have been used, but the debris created by ablation of the solid target has detrimental effects on various components of a system intended for production line operation. A proposed solution to the debris problem is to use a frozen liquid or frozen gas target so that the debris will not plate out onto the optical equipment. However, none of these systems have proven to be practical for production line operation.

It has been well known for many years that x-rays and high energy ultraviolet radiation could be produced in a plasma pinch operation. In a plasma pinch an electric current is passed through a plasma in one of several possible configuration such that the magnetic field created by the flowing electric current accelerates the electrons and ions in the plasma into a tiny volume with sufficient energy to cause substantial stripping of outer electrons from the ions and a consequent production of x-rays and high energy ultraviolet radiation. Various prior art techniques for generation of high energy radiation from focusing or pinching plasmas are described in the following patents:

J.M. Dawson, "X-Ray Generator," *U.S. Patent #3,961,197*, June 1, 1976.

T.G. Roberts, et. al., "Intense, Energetic Electron Beam Assisted X-Ray Generator," *U.S. Patent #3,969,628*, July 13, 1976.

J.H. Lee, "Hypocycloidal Pinch Device," *U.S. Patent #4,042,848*, Aug. 16, 1977.

L. Cartz, et. al., "Laser Beam Plasma Pinch X-Ray System," *U.S. Patent #4,504,964*, Mar. 12, 1985.

A. Weiss, et. al., "Plasma Pinch X-Ray Apparatus," *U.S. Patent #4,536,884*, Aug. 20, 1985.

S. Iwamatsu, "X-Ray Source," *U.S. Patent #4,538,291*, Aug. 27, 1985.

G. Herziger and W. Neff, "Apparatus for Generating a Source of Plasma with High Radiation Intensity in the X-ray Region," *U.S. Patent No. 4,596,030*, June 17, 1986.

A. Weiss, et. al, "X-Ray Lithography System," *U.S. Patent #4,618,971*, Oct. 21, 1986.

A. Weiss, et. al., "Plasma Pinch X-ray Method," *U.S. Patent #4,633,492*, Dec. 30, 1986.

I. Okada, Y. Saitoh, "X-Ray Source and X-Ray Lithography Method," *U.S. Patent #4,635,282*, Jan. 6, 1987.

R.P. Gupta, et. al., "Multiple Vacuum Arc Derived Plasma Pinch X-Ray Source," *U.S. Patent #4,751,723*, June 14, 1988.

R.P. Gupta, et. al., "Gas Discharge Derived Annular Plasma Pinch X-Ray Source," *U.S. Patent #4,752,946*, June 21, 1988.

J.C. Riordan, J.S. Peariman, "Filter Apparatus for use with an X-Ray Source," *U.S. Patent #4,837,794*, June 6, 1989.

W. Neff, et al., "Device for Generating X-radiation with a Plasma Source", *U.S. Patent #5,023,897*, June 11, 1991.

D.A. Hammer, D.H. Kalantar, "Method and Apparatus for Microlithography Using X-Pinch X-Ray Source," *U.S. Patent #5,102,776*, April 7, 1992.

M.W. McGeoch, "Plasma X-Ray Source," *U.S. Patent #5,504,795*, April 2, 1996.

G. Schriever, et al., "Laser-produced Lithium Plasma as a Narrow-band Extended Ultraviolet Radiation Source for Photoelectron Spectroscopy", *Applied Optics*, Vol. 37, No. 7, pp. 1243-1248, March 1998.

R. Lebert, et al., "A Gas Discharged Based Radiation Source for EUV Lithography", *Int. Conf. On Micro and Nano Engineering*, September, 1998.

W. Partlo, I. Fomenkov, D. Birx, "EUV (13.5nm) Light Generation Using a Dense Plasma Focus Device", *SPIE Proc. On Emerging Lithographic Technologies III*, Vol. 3676, pp. 846-858, March 1999.

W. T. Silfast, et al., "High-power Plasma Discharge Source at 13.5nm and 11.4nm for EUV Lithography", *SPIE Proc. On Emerging Lithographic Technologies III*, Vol. 3676, pp. 272-275, March 1999.

F. Wu, et al., "The Vacuum Spark and Spherical Pinch X-ray/EUV Point Sources", *SPIE Proc. On Emerging Lithographic Technologies III*, Vol. 3676, pp. 410-420, March 1999.

I. Fomenkov, W. Partlo, D. Birk, "Characterization of a 13.5nm for EUV Lithography based on a Dense Plasma Focus and Lithium Emission", *Sematech International Workshop on EUV Lithography*, October, 1999.

Typical prior art plasma focus devices can generate large amounts of radiation suitable for proximity x-ray lithography, but are limited in repetition rate due to large per pulse electrical energy requirements, and short lived internal components. The stored electrical energy requirements for these systems range from 1kJ to 100kJ. The repetition rates typically did not exceed a few pulses per second.

What is needed is a production line reliable, simple system for producing high energy ultraviolet and x-radiation which operates at high repetition rates and avoids prior art problems associated with debris formation.

SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention provides a high energy photon source. A pair of plasma pinch electrodes are located in a vacuum chamber. The chamber contains a working gas which includes a noble buffer gas and an active gas chosen to provide a desired spectral line. A pulse power source provides electrical pulses at voltages high enough to create electrical discharges between the electrodes to produce very high temperature, high density plasma pinches in the working gas providing radiation at the spectral line of the active gas. A blast shield positioned just beyond the location of the high density pinch provides a physical barrier which confines the pinch limiting its axial elongation. A small port is provided in the blast shield that permits the radiation but not the plasma to pass through the shield. In a preferred embodiment a surface of the shield facing the plasma is dome-shaped.

In preferred embodiments an external reflection radiation collector-director collects radiation produced in the plasma pinch and directs the radiation in a desired direction. Also in preferred embodiments the active gas is lithium vapor and the buffer gas is helium and the radiation-collector is made of or coated with a material possessing high grazing incidence reflectivity. Good choices for the reflector material are molybdenum, palladium, ruthenium, rhodium, gold or tungsten.

In other preferred embodiments the buffer gas is argon and lithium gas is produced by vaporization of solid or liquid lithium located in a hole along the axis of the central electrode of a coaxial electrode configuration. In preferred embodiments, debris is collected on a conical nested debris collector having surfaces aligned with light rays extending out from the pinch site and directed toward the radiation collector-director. The conical nested debris collector and the radiation collector-director are maintained at a temperature in the range of about 400°C which is above the melting point of lithium and substantially below the melting point of tungsten. Both tungsten and lithium vapor will collect on the debris collector but the lithium will evaporate off the debris collector and the collector-director whereas the tungsten will remain permanently on the debris collector and therefore does not collect on and degrade the reflectivity of the radiation collector-director. The reflection radiation collector-director and the conical nested debris collector could be fabricated together as one part or they could be separate parts aligned with each other and the pinch site.

A unique chamber window may be provided which is designed to transmit EUV light and reflect lower energy light including visible light. This window is preferably a small diameter window comprised of extremely thin material such as silicon, zirconium or beryllium.

Applicants describe herein a Dense Plasma Focus (DPF) prototype device constructed by Applicants and their fellow workers as a source for extreme ultraviolet (EUV) lithography employing an all-solid-state pulse power drive. Using the results from a vacuum grating spectrometer combined with measurements with a silicon photo diode, Applicants have found that substantial amounts of radiation within the reflectance band

of Mo/Si mirrors can be generated using the 13.5nm emission line of doubly ionized Lithium. This prototype DPF converts 25J of stored electrical energy per pulse into approximately 0.76J of in-band 13.5nm radiation emitted into 4π steradians. The pulse repetition rate performance of this device has been investigated up to its DC power supply limit of 200Hz. No significant reduction in EUV output per pulse was found up to this repetition rate. At 200Hz, the measured pulse-to-pulse energy stability was $\sigma=6\%$ and no drop out pulses were observed. The electrical circuit and operation of this prototype DPF device is presented along with a description of several preferred modifications intended to improve stability, efficiency and performance.

The present invention provides a practical implementation of EUV lithography in a reliable, high brightness EUV light source with emission characteristics well matched to the reflection band of the Mo/Si or Mo/Be mirror systems. Since the proposed all-reflective EUV lithography tools are slit scanning based systems, the present invention provides EUV light source with high repetition rate capability.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

FIG. 1 is a drawing of a high energy photon source representing a preferred embodiment of the present invention.

FIG. 2 is a drawing of a three dimensional plasma pinch device with disk shaped electrodes.

FIG. 3 is a drawing of a third preferred embodiment of the present invention.

FIG. 4 is a preferred circuit diagram for a preferred embodiment of the present invention.

FIG. 5A is a drawing of a prototype unit built by Applicants and their fellow workers.

FIG. 5B is a cross section view showing the electrodes of the prototype with spark plug pre-ionizers.

FIGS. 5B1-5B6 are drawings showing the buildup of the plasma pinch.

FIG. 5C shows a cross section of the electrode region with the addition of a blast shield.

FIG. 5C1-5C6 are drawings showing the buildup of the plasma pinch with the blast shield in place.

FIG. 6 is a pulse shape produced by the prototype unit.

FIG. 7. shows a portion of the EUV beam produced by a hypobolic collector.

FIG. 8 shows the 13.5 nm lithium peak relative to reflectivity of MoSi coatings.

FIG. 9 shows a nested conical debris collector.

FIG. 10 shows thin Be window for reflecting visible light and transmitting EUV light.

FIG. 11 is a chart showing reflectivity of various materials for 13.5 nm ultraviolet radiation.

DETAILED DESCRIPTION OF PREFERRED EMBODIMENTS

First Preferred Embodiment

A simplified drawing of a high energy ultraviolet light source is shown in FIG. 1. The major components are a plasma pinch unit 2, a high energy photon collector 4 and a hollow light pipe 6. The plasma pinch source comprises a coaxial electrode 8 powered by a low inductance pulse power circuit 10. The pulse power circuit in this preferred embodiment is a high voltage, energy efficient circuit capable of providing about 5 micro seconds pulses in the range of 1 kV to 2 kV to coaxial electrode 8 at a rate of 1,000 Hz.

A small amount of working gas, such as a mixture of helium and lithium vapor, is present near the base of the electrode 8 as shown in FIG. 1. At each high voltage pulse, avalanche breakdown occurs between the inner and outer electrodes of coaxial electrode 8 either due to preionization or self breakdown. The avalanche process

occurring in the buffer gas ionizes the gas and creates a conducting plasma between the electrodes at the base of the electrodes. Once a conducting plasma exists, current flows between the inner and outer electrodes. In this preferred embodiment, the inner electrode is at high positive voltage and outer electrode is at ground potential. Current will flow from the inner electrode to the outer electrode and thus electrons will flow toward the center and positive ions will flow away from the center. This current flow generates a magnetic field which acts upon the moving charge carriers accelerating them away from the base of the coaxial electrode 8.

When the plasma reaches the end of the center electrode, the electrical and magnetic forces on the plasma, pinch the plasma to a "focus" around a point 10 along the centerline of and a short distance from the end of the central electrode and the pressure and temperature of the plasma rise rapidly reaching extremely high temperatures, in some cases much higher than the temperature at the surface of the sun! The dimensions of the electrodes and the total electrical energy in the circuit are preferably optimized to produce the desired black body temperature in the plasma. For the production of radiation in the 13 nm range a black body temperature of over 20-100 eV is required. In general, for a particular coaxial configuration, temperature will increase with increasing voltage of the electrical pulse. The shape of the radiation spot is somewhat irregular in the axial direction and roughly gaussian in the radial direction. The typical radial dimension of the source is 300 microns and its length is approximately 4 mm.

In most prior art plasma pinch units described in the technical literature, the radiation spot emits radiation in all directions with a spectrum closely approximating a black body. The purpose of the lithium in the working gas is to narrow the spectrum of the radiation from the radiation spot.

Lithium Vapor

Doubly ionized lithium exhibits an electronic transition at 13.5 nm and serves as the radiation source atom in the buffer of helium. Doubly ionized lithium is an excellent choice for two reasons. The first is the low melting point and high vapor pressure of lithium. The lithium ejected from the radiation spot can be kept from plating out onto the chamber walls and collection optics by simply heating these surfaces above 180°C.

The vapor phase lithium can then be pumped from the chamber along with the helium buffer gas using standard turbo-molecular pumping technology. And the lithium can be easily separated from the helium merely by cooling the two gases.

Coating materials are available for providing good reflection at 13.5 nm. FIG. 8 shows the lithium emission peak in relation to the published MoSi reflectivity.

A third advantage of using lithium as the source atom is that non-ionized lithium has a low absorption cross section for 13.5 nm radiation. Furthermore, any ionized lithium ejected from the radiation spot can be easily swept away with a moderate electric field. The remaining non-ionized lithium is substantially transparent to 13.5 nm radiation. The currently most popular proposed source in the range of 13 nm makes use of a laser ablated frozen jet of xenon. Such a system must capture virtually all of the ejected xenon before the next pulse because the absorption cross section for xenon at 13 nm is large.

Radiation Collector

The radiation produced at the radiation spot is emitted uniformly into a full 4π steradians. Some type of collection optics is needed to capture this radiation and direct it toward the lithography tool. Previously proposed 13nm light sources suggested collection optics based on the use of multi-layer dielectric coated mirrors. The use of multi-layer dielectric mirrors is used to achieve high collection efficiency over a large angular range. Any radiation source which produced debris would coat these dielectric mirrors and degrade their reflectivity, and thus reduce the collected output from the source. This preferred system will suffer from electrode erosion and thus would, over time, degrade any dielectric mirror placed in proximity to the radiation spot.

Several materials are available with high reflectivity at small grazing incident angles for 13.5 nm UV light. Graphs for some of these are shown in FIG. 11. Good choices include molybdenum, rhodium and tungsten. The collector may be fabricated from these materials, but preferably they are applied as a coating on a substrate structural material such as nickel. This conic section can be prepared by electroplating nickel on a removable mandrel.

To produce a collector capable of accepting a large cone angle, several conical sections can be nested inside each other. Each conical section may employ more than one reflection of the radiation to redirect its section of the radiation cone in the desired direction. Designing the collection for operation nearest to grazing incidence will produce a collector most tolerant to deposition of eroded electrode material. The grazing incidence reflectivity of mirrors such as this depends strongly on the mirror's surface roughness. The dependence on surface roughness decreases as the incident angle approaches grazing incidence. We estimate that we can collect and direct the 13nm radiation being emitted over a solid angle of least 25 degrees. Preferred collectors for directing radiation into light pipes are shown in FIGS. 1, 2 and 3.

Tungsten Electrodes - Tungsten Coatings for Collector

A preferred method for choosing the material for the external reflection collector is that the coating material on the collector be the same as the electrode material. Tungsten is a promising candidate since it has demonstrated performance as an electrode and the real part of its refractive index at 13nm is 0.945. Using the same material for the electrode and the mirror coating minimizes the degradation of mirror reflectivity as the eroded electrode material plates out onto the collection mirrors.

Silver Electrodes and Coatings

Silver is also an excellent choice for the electrodes and the coatings because it also has a low refractive index at 13 nm and has high thermal conductivity allowing higher repetition rate operation.

Conical Nested Debris Collector

In another preferred embodiment the collector-director is protected from surface contamination with vaporized electrode material by a debris collector which collects all of the tungsten vapor before it can reach the collector director 5. FIG. 9 shows a conical nested debris collector 5 for collecting debris resulting from the plasma pinch. Debris collector 5 is comprised of nested conical sections having surfaces aligned with light rays extending out from the center of the pinch site and directed toward the collector-director 4.

The debris collected includes vaporized tungsten from the tungsten electrodes and vaporized lithium. The debris collector is attached to or is a part of radiation collector-director 4. Both collectors are comprised of nickel plated substrates. The radiation collector-director portion 4 is coated with molybdenum or rhodium for very high reflectivity. Preferably both collectors are heated to about 400°C which is substantially above the melting point of lithium and substantially below the melting point of tungsten. The vapors of both lithium and tungsten will collect on the surfaces of the debris collector 5 but lithium will vaporize off and to the extent the lithium collects on collector-director 4, it will soon thereafter also vaporize off. The tungsten once collected on debris collector 5 will remain there permanently.

FIG. 7 shows the optical features of a collector designed by Applicants. The collector is comprised of five nested grazing incident parabolic reflectors, but only three of the five reflections are shown in the drawing. The two inner reflectors are not shown. In this design the collection angle is about 0.4 steradians. As discussed below the collector surface is coated and is heated to prevent deposition of lithium. This design produces a parallel beam. Other preferred designs such as that shown in FIGS. 1, 3 and 10 would focus the beam. The collector should be coated with a material possessing high grazing incidence reflectivity in the 13.5 nm wavelength range. Two such materials are palladium and ruthenium.

Light Pipe

It is important to keep deposition materials away from the illumination optics of the lithography tool. Therefore, a light pipe 6 is preferred to further assure this separation. The lightpipe 6 is a hollow lightpipe which also employs substantially total external reflection on its inside surfaces. The primary collection optic can be designed to reduce the cone angle of the collected radiation to match the acceptance angle of the hollow lightpipe. This concept is shown in FIG. 1.

The dielectric mirrors of the lithography tool would then be very well protected from any electrode debris since a tungsten, silver or lithium atom would have to diffuse upstream against a flow of buffer gas down the hollow lightpipe as shown in FIG. 1.

Pulse Power Unit

The preferred pulse power unit 10 is a solid state high frequency, high voltage pulse power unit utilizing a solid state trigger and a magnetic switch circuit such as the pulse power units described in United States Patent 5,142,166. These units are extremely reliable and can operate continuously without substantial maintenance for many months and billions of pulses. The teachings of U.S. Patent 5,142,166 are incorporated herein by reference.

FIG. 4 shows a simplified electrical circuit providing pulse power. A preferred embodiment includes DC power supply 40 which is a command resonant charging supply of the type used in excimer lasers. C_0 which is a bank of off the shelf capacitors having a combined capacitance of 65 μ F, a peaking capacitor C_1 which is also a bank of off the shelf capacitors having a combined capacitance of 65 μ F. Saturable inductor 42 has a saturated drive inductance of about 1.5 nH. Trigger 44 is an IGBT. Diode 46 and inductor 48 creates an energy recovery circuit similar to that described in U.S. Patent No. 5,729,562 permitting reflected electrical energy from one pulse to be stored on C_0 prior to the next pulse.

The System - First Preferred Embodiment

Thus, as shown in FIG. 1, in a first preferred embodiment, a working gas mixture of helium and lithium vapor is discharged into coaxial electrode 8. Electrical pulses from pulse power unit 10 create a dense plasma focus at 11 at sufficiently high temperatures and pressures to doubly ionize the lithium atoms in the working gas generating ultraviolet radiation at about 13.5 nm wavelength.

This light is collected in total external reflection-collector 4 and directed into hollow light pipe 6 where the light is further directed to a lithography tool (not shown). Discharge chamber 1 is maintained at a vacuum of about 4 Torr with turbo suction pump 12. Some of the helium in the working gas is separated in helium separator 14 and used to purge the lightpipe as shown in FIG. 1 at 16. The pressure of helium in the light pipe is preferably matched to the pressure requirements of the lithography tool which typically is maintained at a low pressure or vacuum. The temperature of the working gas is maintained at the desired temperature with heat exchanger 20 and the gas is cleaned with electrostatic filter 22. The gas is discharged into the coaxial electrode space as shown in FIG. 1.

Prototype Unit

A drawing of a prototype plasma pinch unit built and tested by Applicant and his fellow workers is shown in FIG. 5. Principal elements are C₁ capacitor decks, C₂ capacitor decks 1 GBT switches, saturable inductor 42, vacuum vessel 3, and coaxial electrode 8.

Test Results

FIG. 6 shows a typical pulse shape measured by Applicant with the unit shown in FIG. 5. Applicants have recorded C₁ voltage, C₁ current and intensity at 13.5 nm over an 8 microsecond period. The integrated energy in this typical pulse is about 0.8-J. The pulse width (at FWHM) is about 280 ns. The C₁ voltage prior to breakdown is a little less than 1 KV.

This prototype embodiment can be operated at a pulse rate up to 200 Hz. The measured average in-band 13.5 nm radiation at 200 Hz is 152 W in 4π steradians. Energy stability at 1 sigma is about 6%. Applicants estimate that 3.2 percent of the energy can be directed into a useful 13.5 nm beam with the collector 4 shown in FIG. 1.

Second Preferred Plasma Pinch Unit

A second preferred plasma pinch unit is shown in FIG. 2. This unit is similar to the plasma pinch device described in United States Patent No. 4,042,848. This unit comprises two outer disk shaped electrodes 30 and 32 and an inner disk shaped electrode 36. The pinch is created from three directions as described in Patent No. 4,042,848 and as indicated in FIG. 2. The pinch starts near the circumference of the electrodes and proceeds toward the center and the radiation spot is developed along the axis of symmetry and at the center of the inner electrode as shown in FIG. 2 at 34. Radiation can be collected and directed as described with respect to the FIG. 1 embodiment. However, it is possible to capture radiation in two directions coming out of both sides of the unit as shown in FIG. 2. Also, by locating a dielectric mirror at 38, a substantial percentage of the radiation initially reflected to the left could be reflected back through the radiation spot. This should stimulate radiation toward the right side.

Third Preferred Embodiment

A third preferred embodiment can be described by reference to FIG. 3. This embodiment is similar to the first preferred embodiment. In this embodiment, however, the buffer gas is argon. Helium has the desirable property that it is relatively transparent to 13 nm radiation, but it has the undesired property that it has a small atomic mass. The low atomic mass forces us to operate the system at a background pressure of 2-4 Torr. An additional drawback of the small atomic mass of He is the length of electrode required to match the acceleration distance with the timing of the electrical drive circuit. Because He is light, the electrode must be longer than desired so that the He falls off the end of the electrode simultaneous with the peak of current flow through the drive circuit.

A heavier atom such as Ar will have a lower transmission than He for a given pressure, but because of its higher mass can produce a stable pinch at a lower pressure. The lower operating pressure of Ar more than offsets the increased absorption properties of Ar. Additionally, the length of the electrode required is reduced due to the higher atomic mass. A shorter electrode is advantageous for two reasons. The first is a resulting reduction in circuit inductance when using a shorter electrode. A lower inductance makes the drive circuit more efficient and thus reduces the required electrical pump energy. The second advantage of a shorter electrode is a reduction in the thermal conduction path length from the tip of the electrode to the base. The majority of the thermal energy imparted to the electrode occurs at the tip and the conductive cooling of the electrode occurs mainly at the base (radiative cooling also occurs). A shorter electrode leads to a smaller temperature drop down its length from the hot tip to the cool base. Both the smaller pump energy per pulse and the improved cooling path allow the system to operate at a higher repetition rate. Increasing the repetition rate directly increases the average optical output power of the system. Scaling the output power by increasing repetition rate, as opposed to increasing the energy per pulse, is the most desired method for the average output power of lithography light sources.

In this preferred embodiment the lithium is not injected into the chamber in gaseous form as in the first and second embodiments. Instead solid lithium is placed in a hole in the center of the central electrode as shown in FIG. 3. The heat from the electrode then brings the lithium up to its evaporation temperature. By adjusting the height of the lithium relative to the hot tip of the electrode one can control the partial pressure of lithium near the tip of the electrode. One preferred method of doing this is shown in FIG. 3. A mechanism is provided for adjusting the tip of the solid lithium rod relative to the tip of the electrode. Preferably the system is arranged vertically so that the open side of coaxial electrodes 8 is the top so that any melted lithium will merely puddle near the top of the center electrode. The beam will exit straight up in a vertical direction as indicated in FIG. 5A. (An alternative approach is to heat the electrode to a temperature in excess of the lithium melting point so that the lithium is added as a

liquid.) Extremely low flow pumps are available for pumping the liquid at rates needed for any specified repetition rates. A tungsten wick can be used to wick the liquid lithium to region of the central electrode tip.

The hole down the center of the electrode provides another important advantage. Since the plasma pinch forms near the center of the tip of the central electrode, much of the energy is dissipated in this region. Electrode material near this point will be ablated and eventually end up on other surfaces inside the pressure vessel. Employing an electrode with a central hole greatly reduces the available erosion material. In addition, Applicant's experiments have shown that the existence of lithium vapor in this region further reduces the erosion rate of electrode material. A bellows or other appropriate sealing method should be used to maintain a good seal where the electrode equipment enters the chamber. Replacement electrodes fully loaded with the solid lithium can be easily and cheaply manufactured and easily replaced in the chamber.

Small Vacuum Chamber Window

The pinch produces a very large amount of visible light which needs to be separated from the EUV light. Also, a window is desirable to provide additional assurance that lithography optics are not contaminated with lithium or tungsten. The extreme ultraviolet beam produced by the present invention is highly absorbed in solid matter.

Therefore providing a window for the beam is a challenge. Applicants preferred window solution is to utilize an extremely thin foil which will transmit EUV and reflect visible. Applicants preferred window is a foil (about 0.2 to 0.5 micron) of beryllium tilted at an incident angle of about 10° with the axis of the incoming beam.

With this arrangement, almost all of the visible light is reflected and about 50 to 80 percent of the EUV is transmitted. Such a thin window, of course, is not very strong.

Therefore, Applicants use a very small diameter window and the beam is focused through the small window. Preferably the diameter of the thin beryllium window is about 10 mm. Heating of the little window must be considered, and for high repetition rates special cooling of the window will be needed.

In some designs this element can be designed merely as a beam splitter which will simplify the design since there will be no pressure differential across the thin optical element.

FIG. 10 shows a preferred embodiment in which radiation collector 4 is extended by collector extension 4A to focus the beam 9 through 0.5 micron thick 1 mm diameter beryllium window 7.

Preionization

Applicants' experiments have shown that good results can be obtained without preionization but performance is improved with preionization. The prototype unit shown in FIG. 5 comprises DC driven spark gap preionizers to preionize the gas between the electrodes. Applicants will be able to greatly improve these energy stability values and improve other performance parameters with improved preionization techniques. Preionization is a well developed technique used by Applicants and others to improve performance in excimer lasers. Preferred preionization techniques include:

- 1) DC drive spark gap
- 2) RF driven spark gap
- 3) RF driven surface discharge
- 4) Corona discharge
- 5) Spiker circuit in combination with preionization

These techniques are well described in scientific literature relating to excimer lasers and are well known.

Blast Shield

FIG. 5B shows the location of two of a total of eight spark plugs 138 providing preionization in a preferred embodiment. This figure also shows the cathode 111 and the anode 123 comprised of a stainless steel outer part and a tungsten inner part. Insulator shroud encircles the lower portion of anode 123 and a 5 mill thick film

insulator 125 completes the isolation of the anode from the cathode. FIGS. 5B1-6 show the progression of a typical pulse leading to a pinch which is fully developed in FIG. 5B5 at about 1.2 μ s after the initiation of the discharge.

During the discharge plasma is accelerated toward the tip of the anode by the Lorence forces acting on the ions and electrons created by the current flow through the plasma. Upon reaching the tip of the electrode shown at 121 in FIG. 5B force vectors directed radially compress and heat the plasma to high temperatures.

Once the plasma is compressed, the existing axially directed forces acting on the plasma tend to elongate the plasma column as shown especially in FIG. 5B6. It is this elongation that leads to instabilities. Once the plasma column has grown along the axis beyond a certain point, the voltage drop across the region of compressed plasma becomes too large to be sustained by the low pressure gas in the region around and near the tip of the anode. Arc-over occurs and much or all of the current flows through the shorter, lower density region of gas near the tip of the anode as shown by the dashed line in FIG. 5B6. This arc-over is detrimental because it produces instabilities in the pulse and causes relatively rapid electrode erosion.

A solution to this problem is to provide a physical barrier to motion of the plasma column in the axial direction. Such a barrier is shown as element number 143 in FIG. 5C and is called by Applicants a blast shield because it acts like a shield against the plasma exhaust of the PDF device. The blast shield must be made of an electrically insulating material with robust mechanical and thermal properties. In addition, the chemical compatibility of the blast shield material must be considered when operating with highly reactive elements such as Lithium. Lithium is a proposed emission element for this EUV source due to its intense emission at 13.5 nm. An excellent candidate is single crystal aluminum oxide, sapphire or an amorphous sapphire such as the trademarked material Lucalux manufactured by General Electric.

The optimum shape of the blast shield has been found to be a dome centered on the anode with a radius equal to the diameter of the anode as shown in FIG. 5C. Such a

shape closely matches the naturally occurring plasma current lines when the plasma is under maximum compression. If the blast shield is placed further from the anode tip, then the plasma column will be too long leading to insufficient plasma heating and the risk of arc-over. If the blast shield is placed too close to the anode tip then current flow from the central axis out and down toward the cathode is restricted, again leading to insufficient plasma heating.

The hole in the top side of blast shield 143 at 144 is required to allow EUV radiation to escape and be collected for use. This hole must be made as small as possible due to the tendency of the plasma to leak out through this hole and form a long narrow column above the blast shield. A bevel cut into this hole as shown at 144 allows for greater off-axis collection of the EUV radiation produced by the plasma pinch device.

FIGS. 5C1-6 show how the blast shield contains the plasma pinch and prevents arc-over.

It is understood that the above described embodiments are illustrative of only a few of the many possible specific embodiments which can represent applications of the principals of the present invention. For example, instead of recirculating the working gas it may be preferable to merely trap the lithium and discharge the helium. Use of other electrode - coating combinations other than tungsten and silver are also possible. For example copper or platinum electrodes and coatings would be workable. Other techniques for generating the plasma pinch can be substituted for the specific embodiment described. Some of these other techniques are described in the patents referenced in the background section of this specification, and those descriptions are all incorporated by reference herein. Many methods of generating high frequency high voltage electrical pulses are available and can be utilized. An alternative would be to keep the lightpipe at room temperature and thus freeze out both the lithium and the tungsten as it attempts to travel down the length of the lightpipe. This freeze-out concept would further reduce the amount of debris which reached the optical

components used in the lithography tool since the atoms would be permanently attached to the lightpipe walls upon impact. Deposition of electrode material onto the lithography tool optics can be prevented by designing the collector optic to re-image the radiation spot through a small orifice in the primary discharge chamber and use a differential pumping arrangement. Helium or argon can be supplied from the second chamber through the orifice into the first chamber. This scheme has been shown to be effective in preventing material deposition on the output windows of copper vapor lasers. Lithium hydride may be used in the place of lithium. The unit may also be operated as a static-fill system without the working gas flowing through the electrodes. Of course, a very wide range of repetition rates are possible from single pulses to about 5 pulses per second to several hundred or thousands of pulses per second. If desired, the adjustment mechanism for adjusting the position of the solid lithium could be modified so that the position of the tip of the central electrode is also adjustable to account for erosion of the tip.

Many other electrode arrangements are possible other than the ones described above. For example, the outside electrode could be cone shaped rather than cylindrical as shown with the larger diameter toward the pinch. Also, performance in some embodiments could be improved by allowing the inside electrode to protrude beyond the end of the outside electrode. This could be done with spark plugs or other preionizers well known in the art. Another preferred alternative is to utilize for the outer electrode an array of rods arranged to form a generally cylindrical or conical shape. This approach helps maintain a symmetrical pinch centered along the electrode axis because of the resulting inductive ballasting.

Accordingly, the reader is requested to determine the scope of the invention by the appended claims and their legal equivalents, and not by the examples which have been given.

CLAIMS

What is claimed is:

1. A high energy photon source comprising:
 - A. a vacuum chamber,
 - B. at least two electrodes located within said vacuum chamber and defining an electrical discharge region and arranged to create high frequency plasma pinches at a pinch site upon electrical discharge,
 - C. a working gas comprising an active gas and a buffer gas, said buffer gas being a noble gas, and said active gas being chosen to provide light at least one spectral line,
 - D. a working gas supply system for supplying a working gas to said discharge region,
 - E. a pulse power source for providing electrical pulses and voltages high enough to create electrical discharge between said at least one pair of electrode, and
 - F. a blast shield comprised of electrical insulator material positioned to limit elongation of said plasma pinches.
2. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said blast shield comprises a hole located so as to permit extreme ultraviolet light rays from said pinch to pass through said blast shield.
3. A high energy photon source as in Claim 2 wherein said hole is beveled to permit increased off axis collection of the light rays.
4. A high energy photon source as in Claim 1 and further comprising an external reflection radiation collector-director for collecting radiation produced in said plasma pinches and for directing said radiation in a desired direction.

5. A high energy photon source as in Claim 4 and further comprising a conical nested debris collector with surfaces aligned with light rays extending out from the pinch site toward the radiation collector-director.

6. A high energy photon source as in Claim 5 wherein said conical nested debris collector is fabricated as a part of said radiation collector-director.

7. A high energy photon source as in Claim 5 wherein said active gas is a vapor of a metal defining a melting point and further comprising a heating means to maintain said radiation collector and said debris collector at a temperature in excess of the melting point of said metal.

8. A high energy photon source as in Claim 4 wherein said metal is lithium.

9. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said pulse power source is programmable to provide electrical pulses at frequencies of at least 1000 Hz.

10. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said active gas is produced by heating of a material.

11. A high energy photon source as in Claim 6 wherein said material is lithium.

12. A high energy photon source as in Claim 7 wherein said lithium is located in one of said two electrodes.

13. A high energy photon source as in Claim 8 wherein said two electrodes are configured coaxially to define a central electrode defining an axis and a central tip and said lithium is positioned along said axis.

14. A high energy photon source as in Claim 10 and further comprising a position adjustment means to adjust said lithium relative to said central electrode tip.

15. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said active gas is lithium vapor.

16. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said active gas is lithium hydride.

17. A high energy photon source as in Claim 1 and further comprising a light pipe arranged to transmit radiation collected and directed by said collector-director.

18. A high energy photon source as in Claim 4 wherein said electrodes are comprised of an electrode material and said collector-director is coated with the same electrode material.

19. A high energy photon source as in Claim 18 wherein said electrode material is tungsten.

20. A high energy photon source as in Claim 19 wherein said electrode material is silver.

21. A high energy photon source as in Claim 18 wherein said buffer gas is helium.

22. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said buffer gas is argon.

23. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said buffer gas is radon.

24. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said at least two electrodes are three disk shaped electrodes defining two outer electrodes and an inner electrode, said two inner electrodes during operation being at a polarity opposite said inner electrode.

25. A high energy photon source as in Claim 1 wherein said two electrodes are configured coaxially to define a central electrode defining an axis and an outer electrode comprised of an array of rods.

26. A high energy photon source as in Claim 25 wherein said array of rods are arranged to form in a generally cylindrical shape.

27. A high energy photon source as in Claim 25 wherein said array of rods are arranged to form a generally conical shape.

28. A high energy source as in Claim 1 and further comprising a preionizer for preionizing said working gas.

29. A high energy source as in Claim 28 wherein said preionizer is a DC spark gap ionizer.

30. A high energy source as in Claim 28 wherein said preionizer is a RF driven spark gap.

31. A high energy source as in Claim 29 wherein said preionizer is a RF driven surface discharge.

32. A high energy source as in Claim 29 wherein said preionizer is a corona discharge.

33. A high energy source as in Claim 28 wherein said preionizer comprises a spiker circuit.

34. A high energy source as in Claim 1 and further comprising a vacuum chamber window for transmitting extreme ultraviolet radiation and reflecting visible light.

35. A high energy source as in Claim 34 wherein said window is comprised of a sheet of a solid material having a thickness of less than 1 micron.

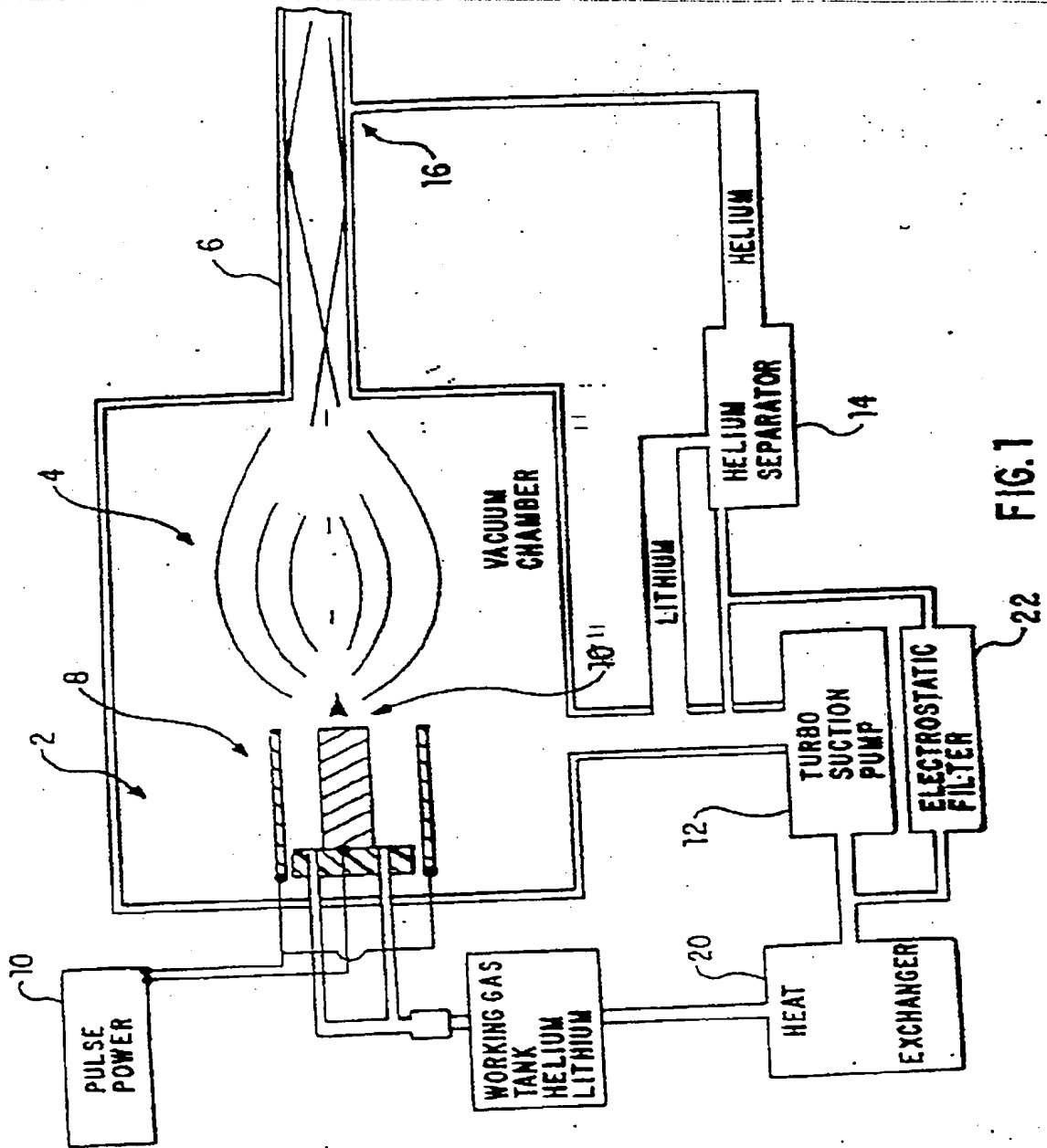
36. A high energy source as in Claim 34 wherein said material is chosen from a group of materials consisting of beryllium and silicon.

37. A high energy photon source as in Claim 34 and further comprising a focusing means for focusing said radiation on to said windows.

38. A high energy source as in Claim 1 and further comprising a beam splitter for transmitting extreme ultraviolet radiation and reflecting visible light.

39. A high energy source as in Claim 38 wherein said window is comprised of a sheet of a solid material having a thickness of less than 1 micron.

40. A high energy source as in Claim 38 wherein said material is chosen from a group of materials consisting of beryllium, zirconium and silicon.



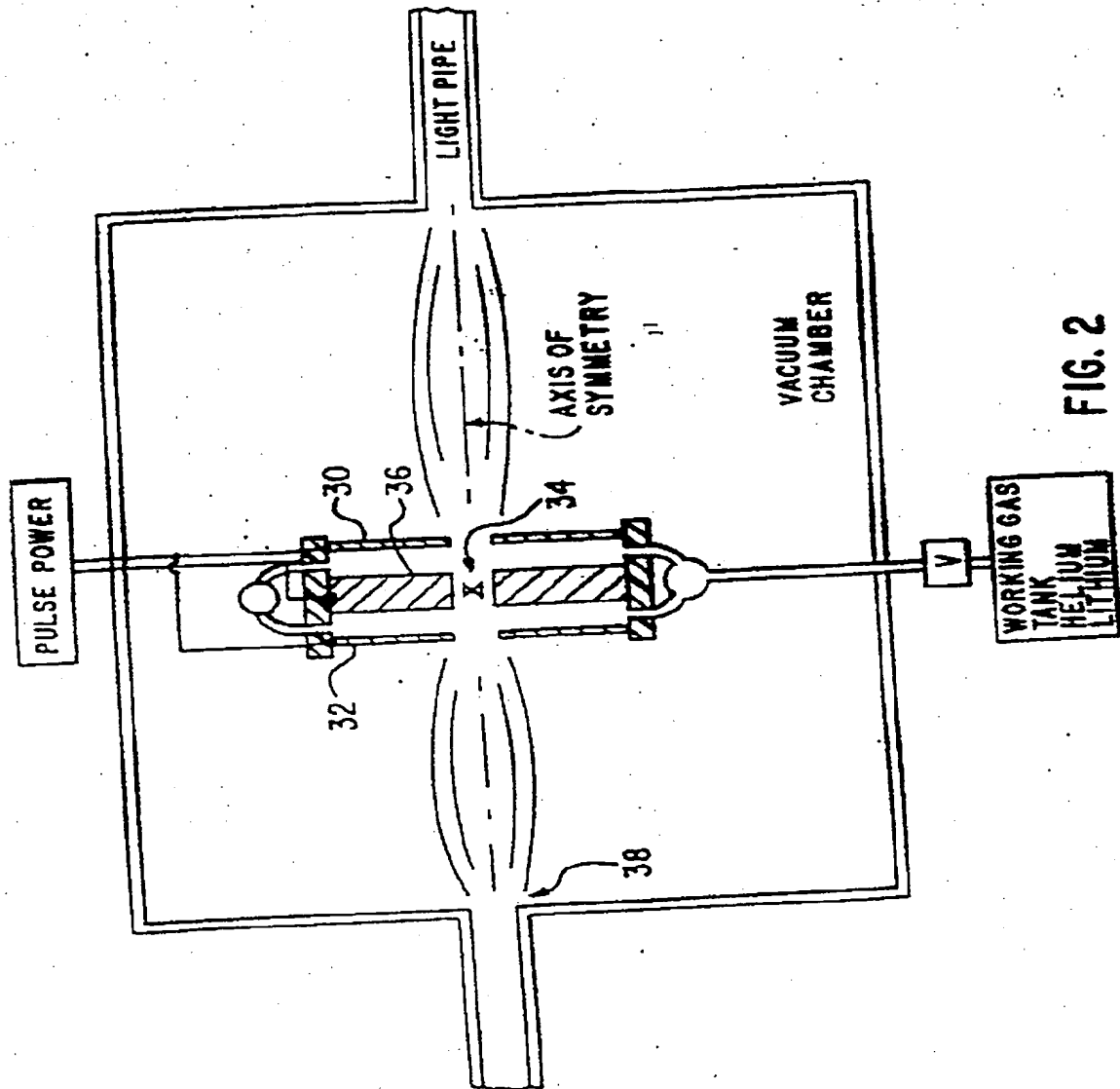
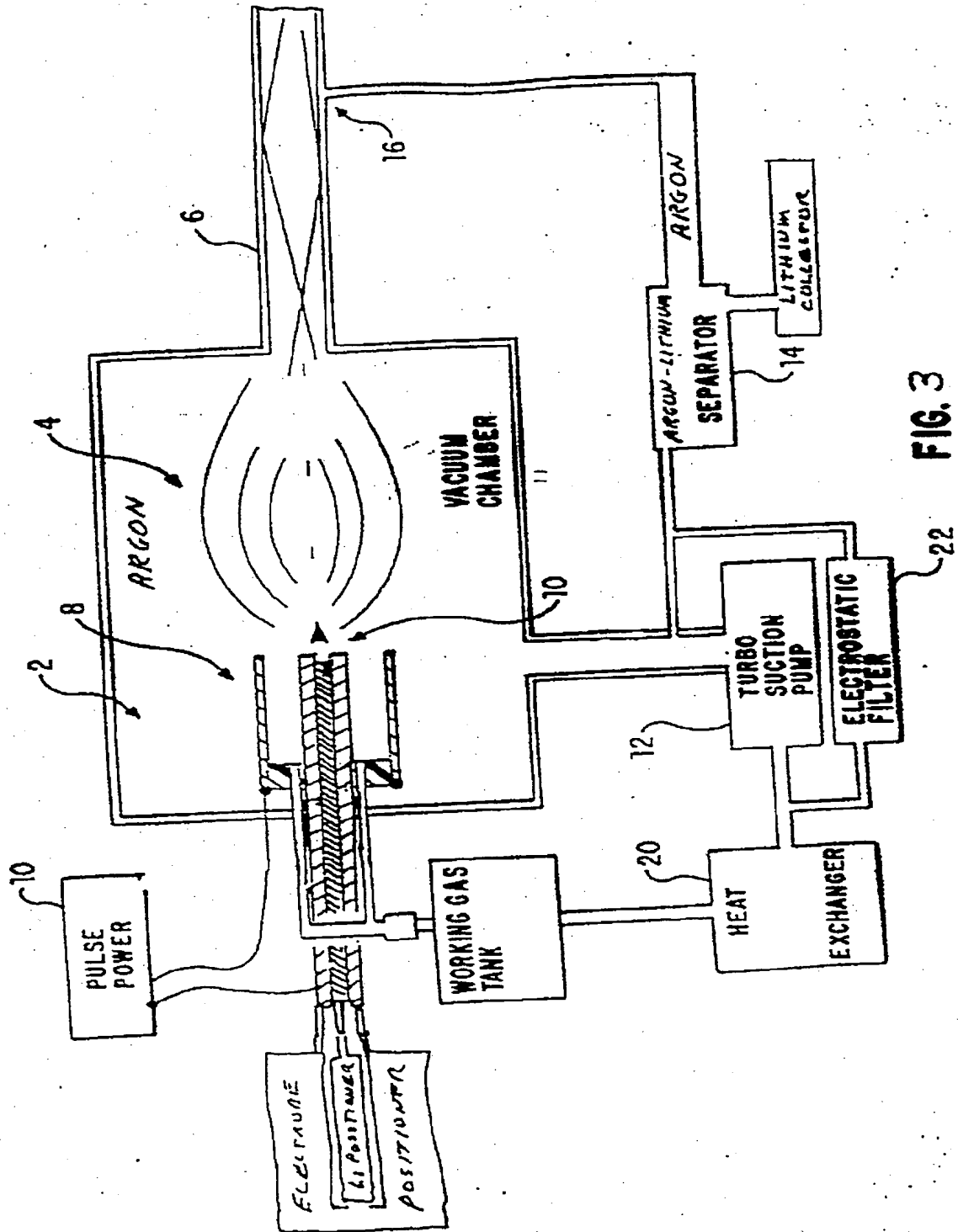


FIG. 2



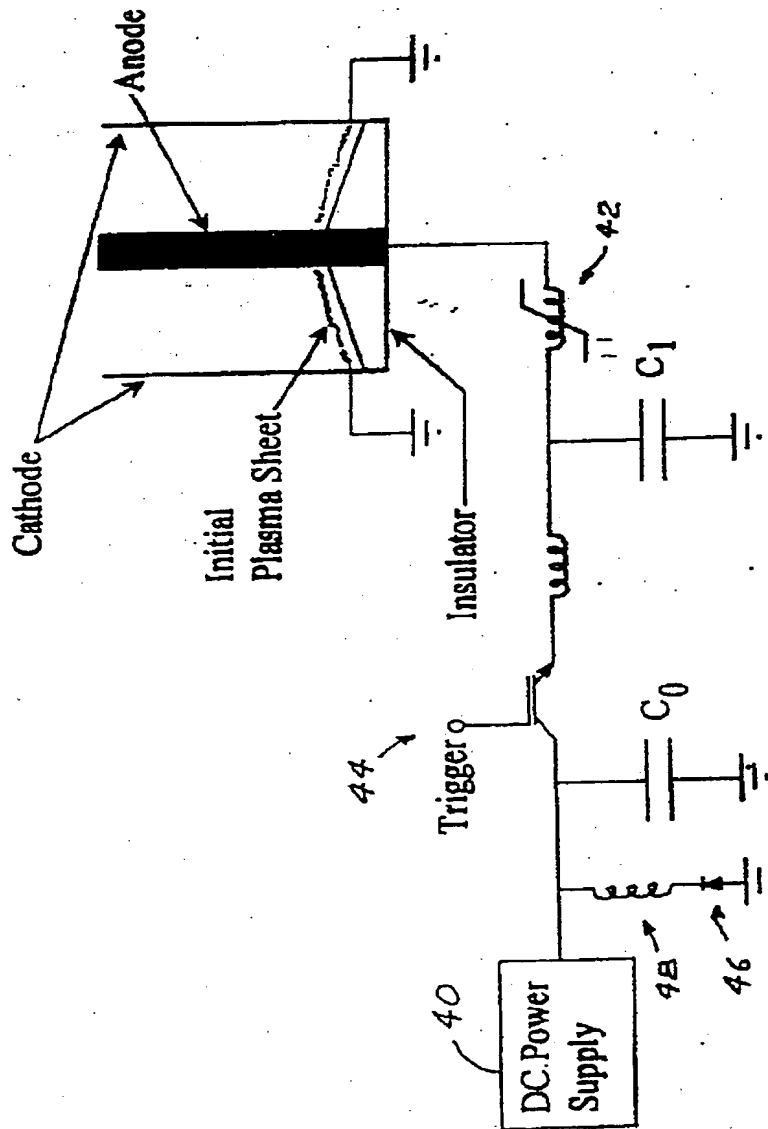
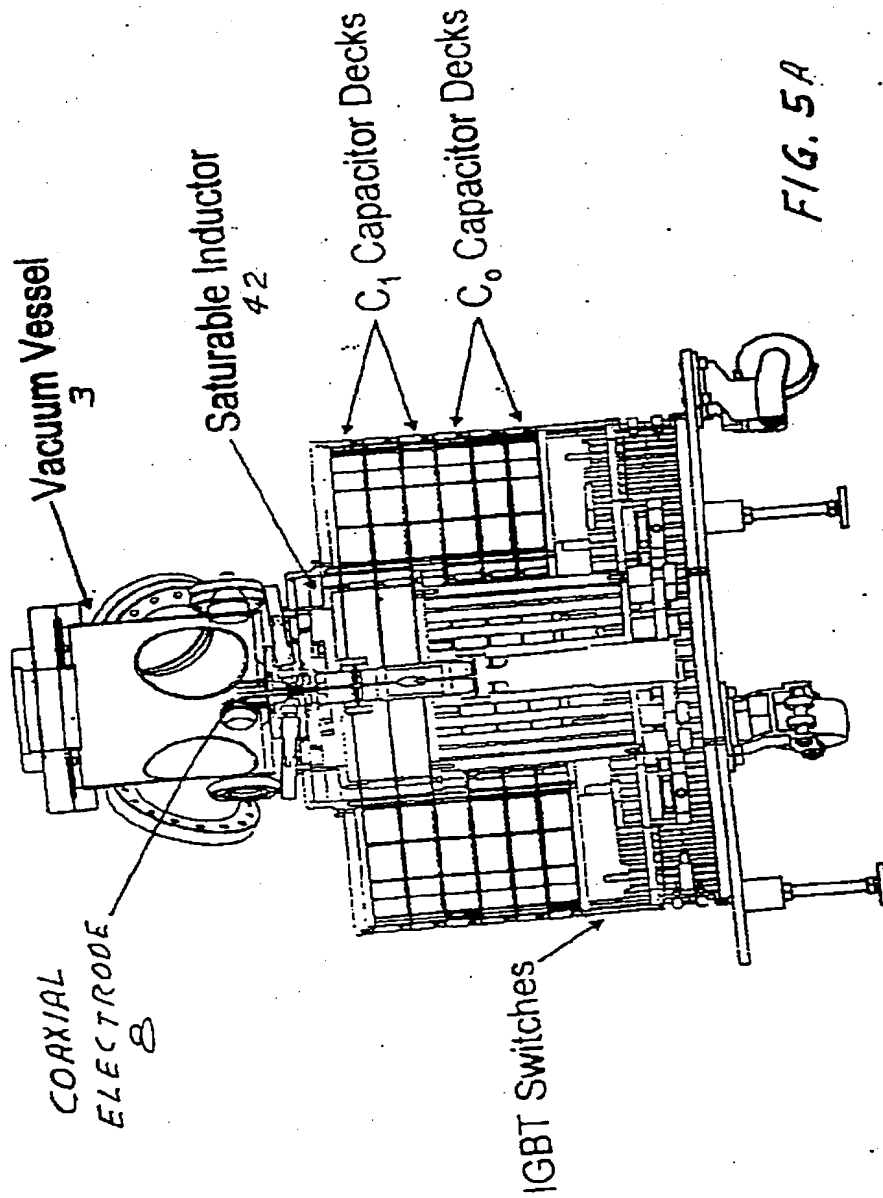


FIG. 4



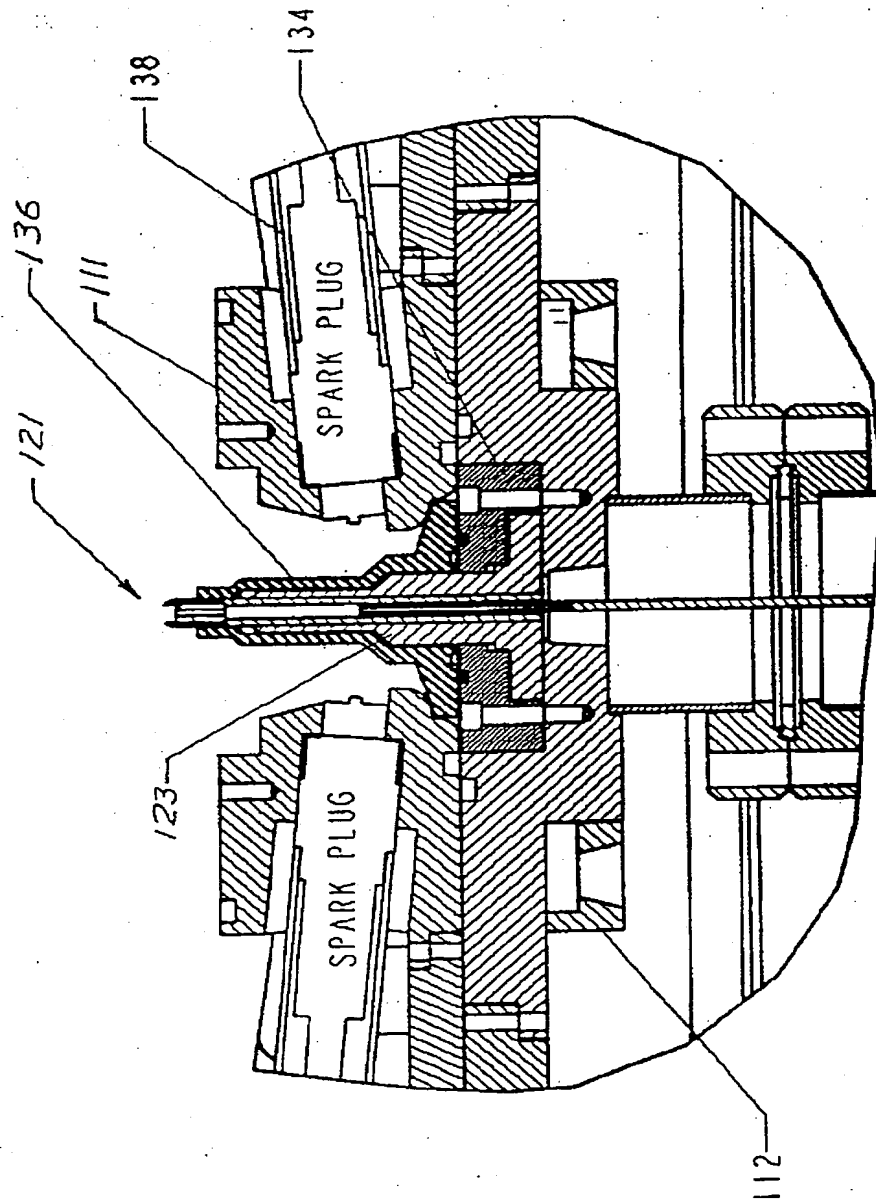
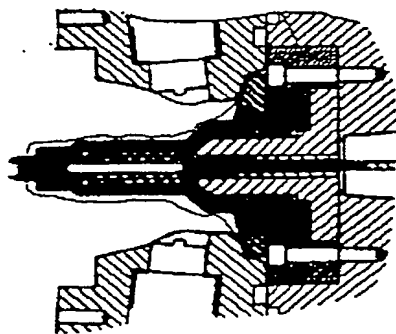


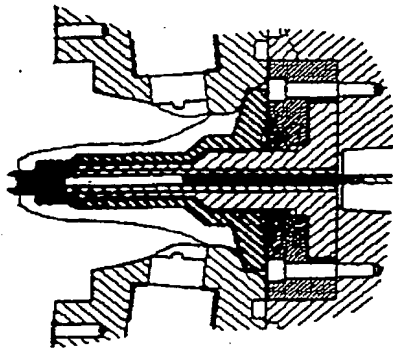
FIGURE 5B

FIG. 5B1



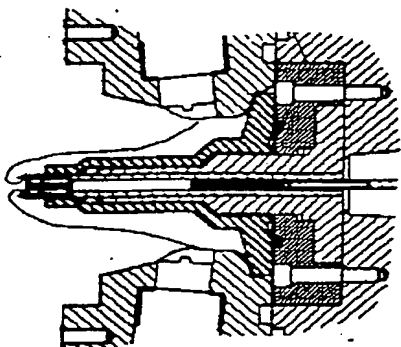
TIME = 0

FIG. 5B2



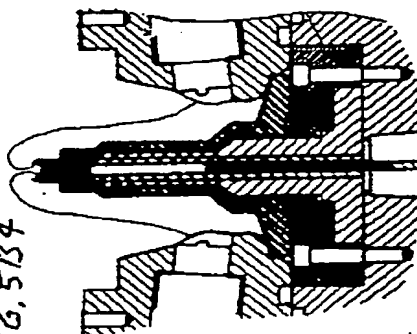
TIME = 0.3 μ s

FIG. 5B3



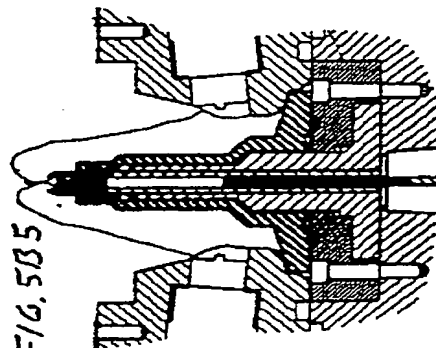
TIME = 0.6 μ s

FIG. 5B4



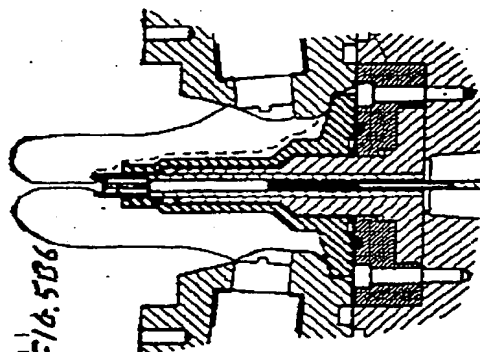
TIME = 0.9 μ s

FIG. 5B5



TIME = 1.2 μ s

FIG. 5B6



TIME = 1.5 μ s

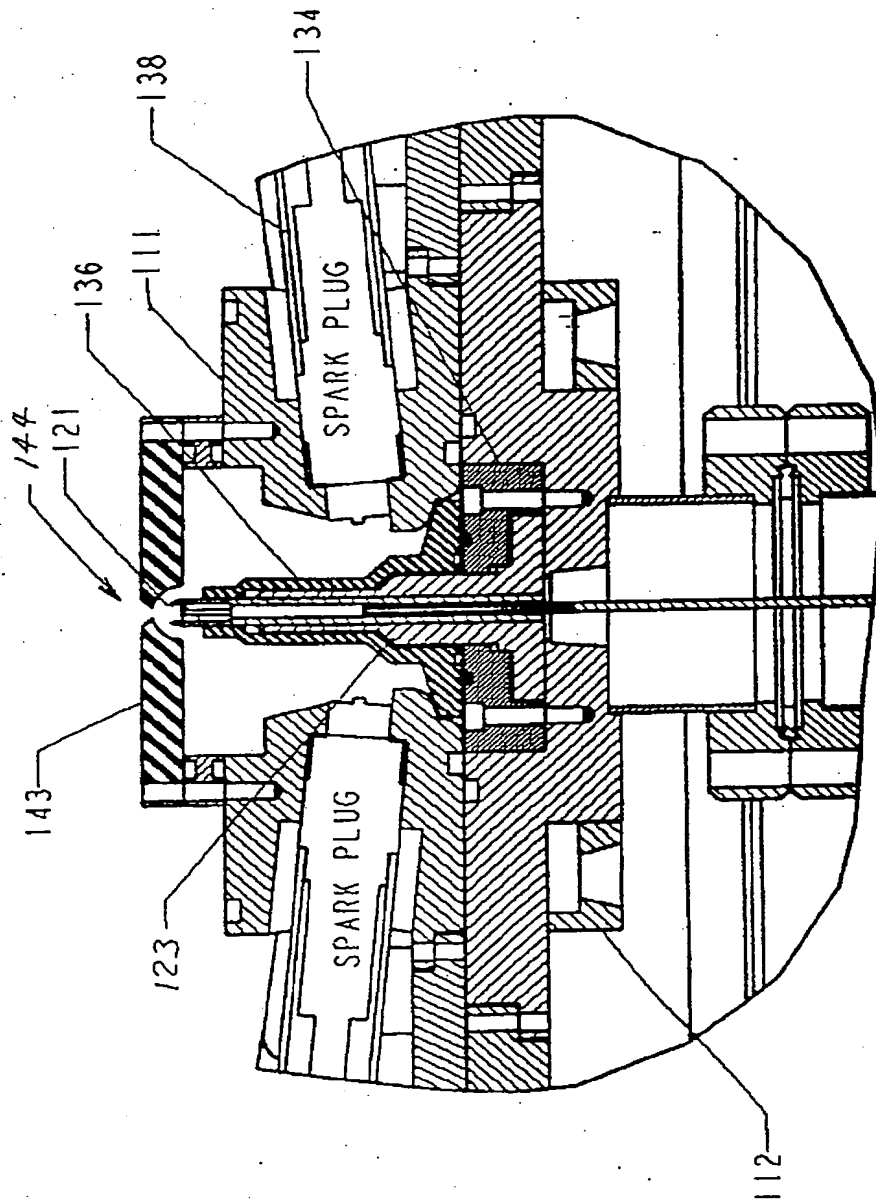
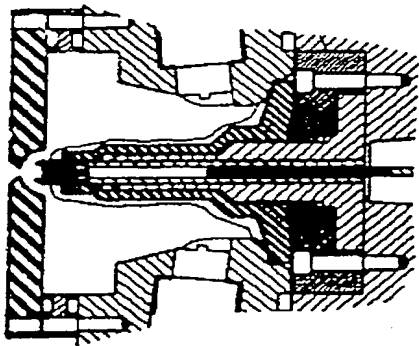


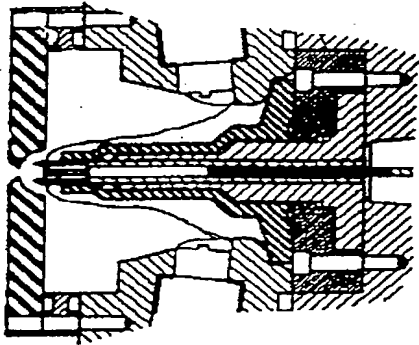
FIGURE 5C

FIG. 5C1



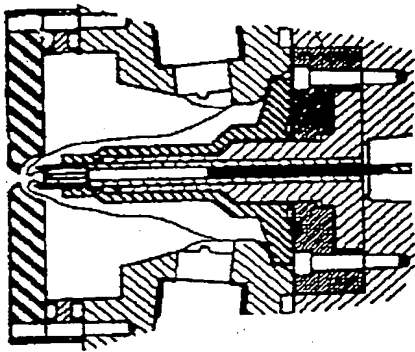
TIME = 0

FIG. 5C2



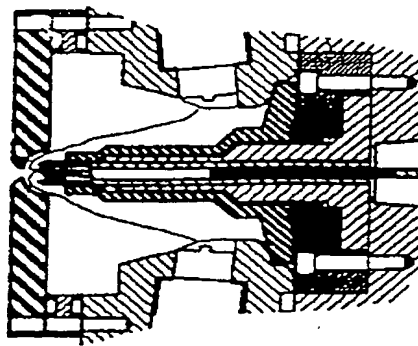
TIME = 0.3 μ s

FIG. 5C3



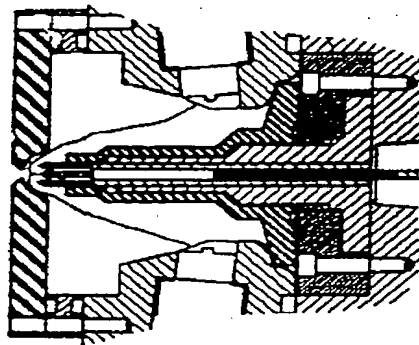
TIME = 0.6 μ s

FIG. 5C4



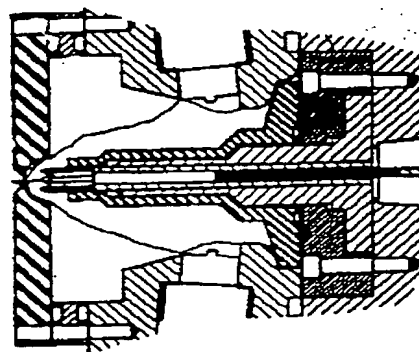
TIME = 0.9 μ s

FIG. 5C5



TIME = 1.2 μ s

FIG. 5C6



TIME = 1.5 μ s

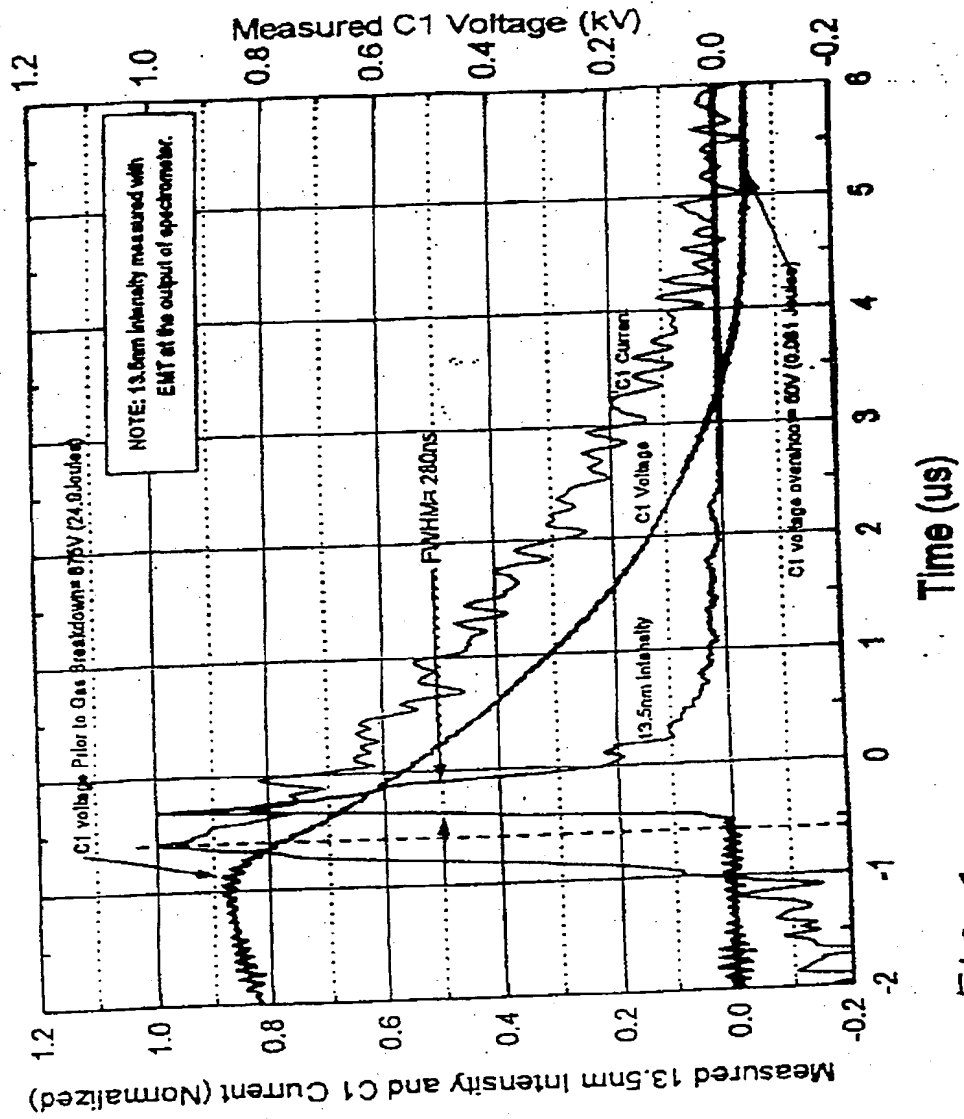


FIG. 6

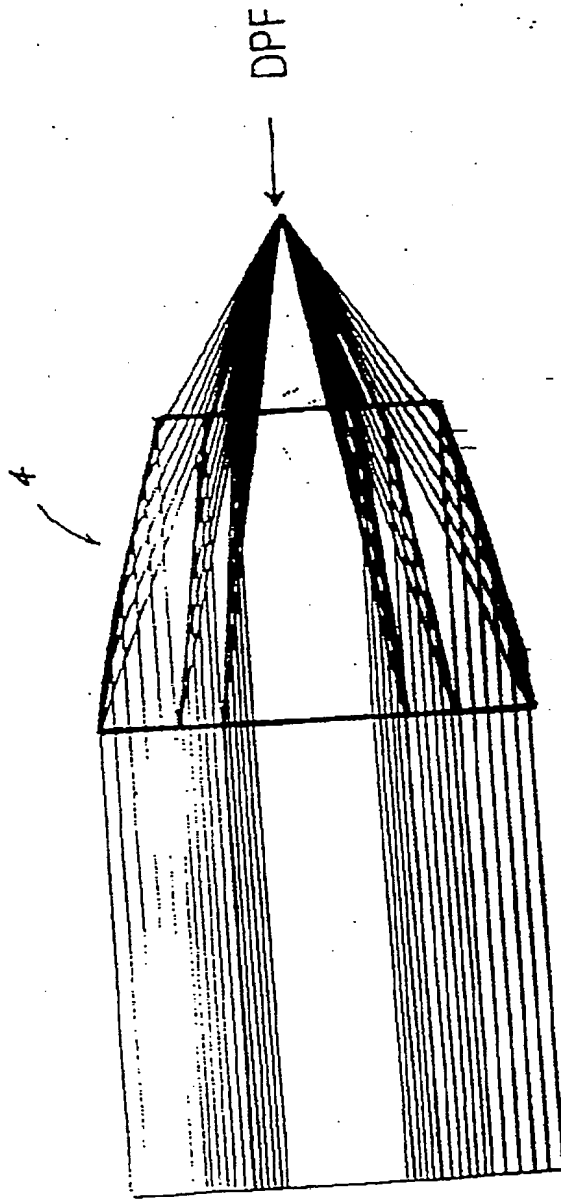


FIG. 7

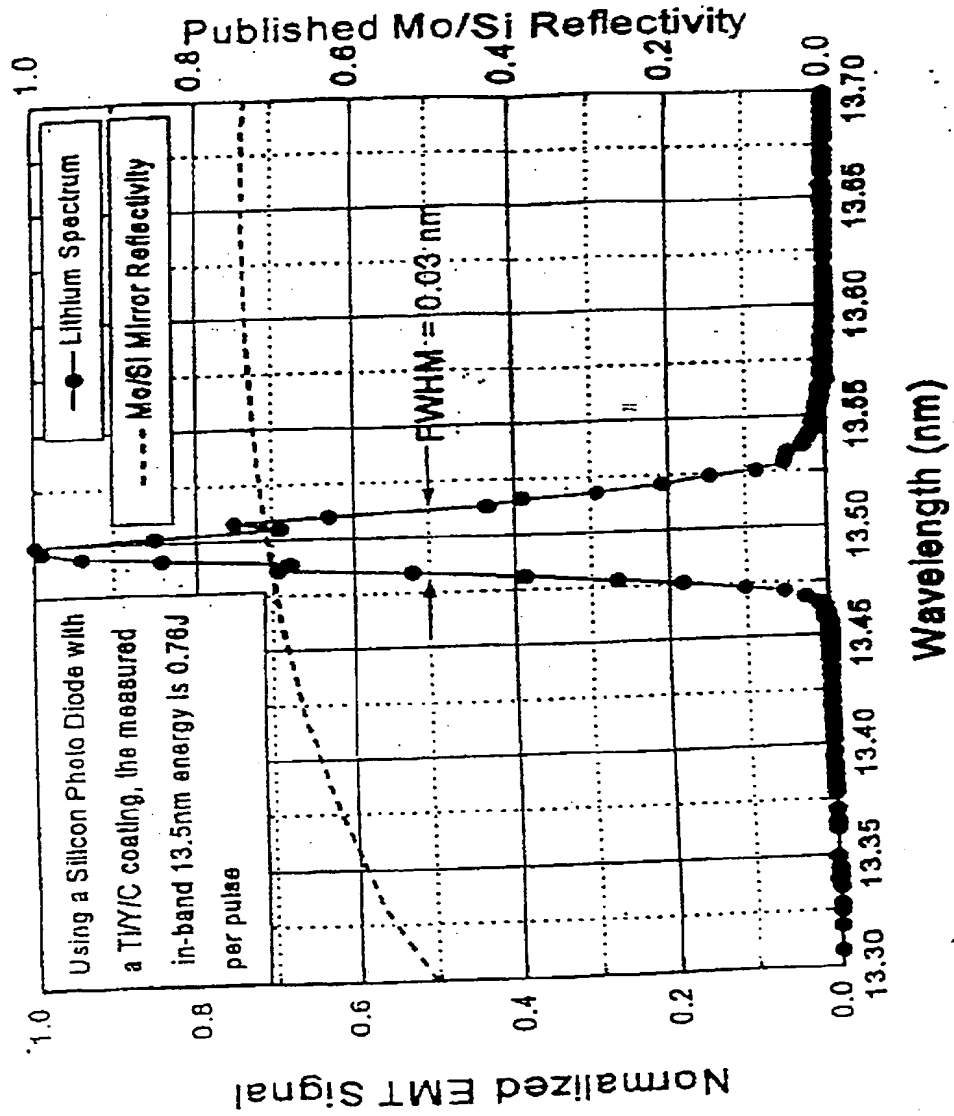
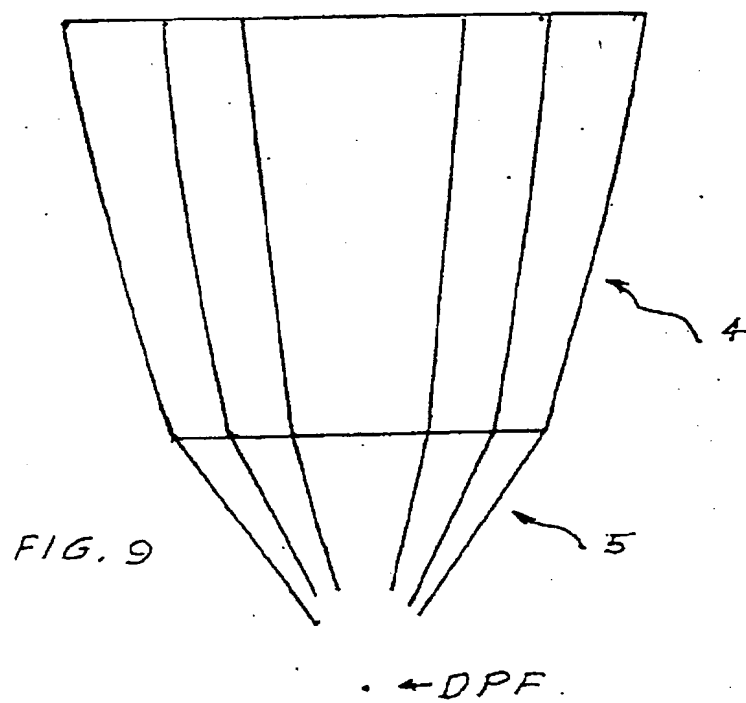
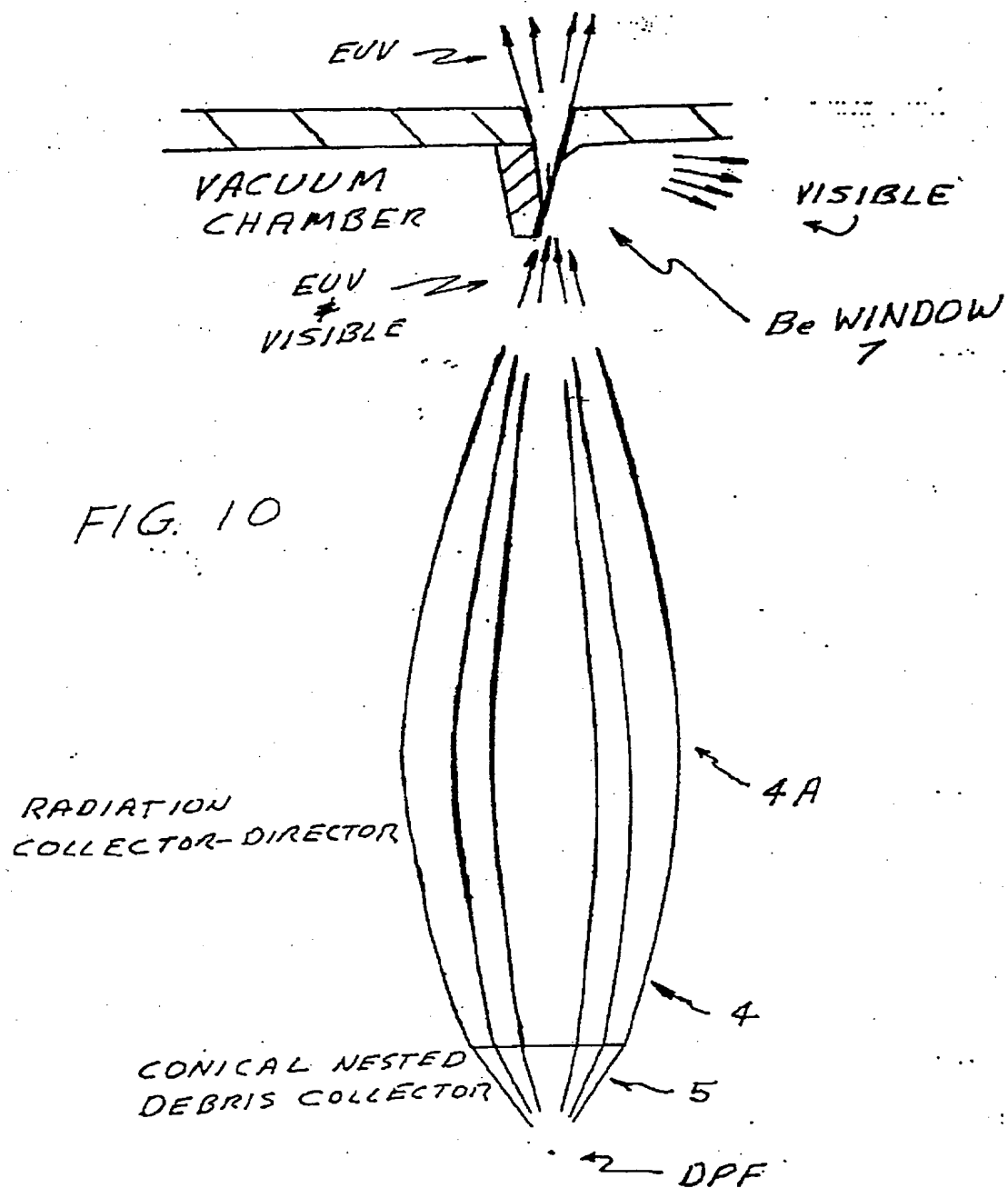


FIG. 8





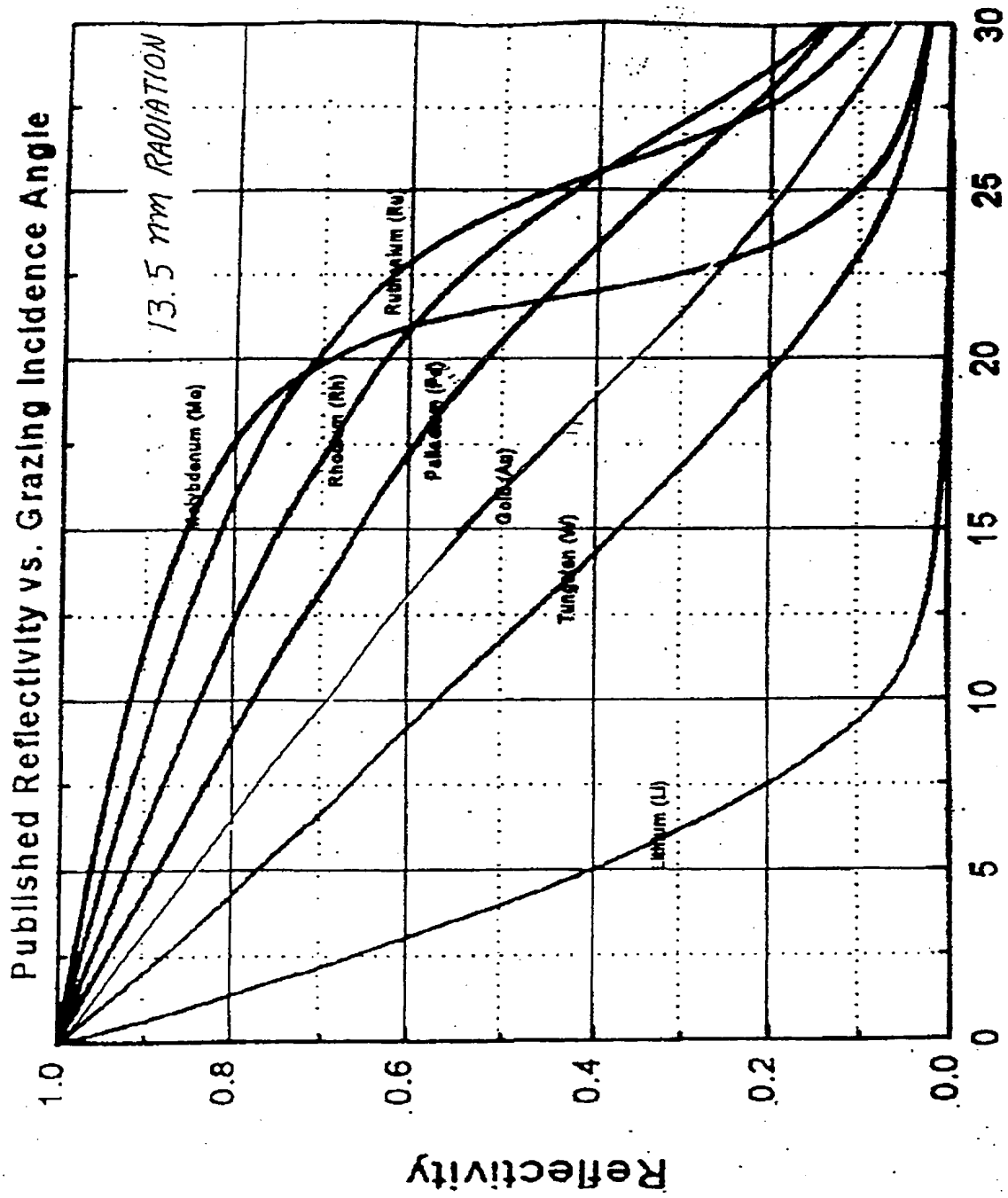


FIG. 11

Grazing Incidence Angle (Degrees)

PLASMA FOCUS HIGH ENERGY PHOTON SOURCE WITH BLAST SHIELD

ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

A high energy photon source. A pair of plasma pinch electrodes are located in a vacuum chamber. The chamber contains a working gas which includes a noble buffer gas and an active gas chosen to provide a desired spectral line. A pulse power source provides electrical pulses at voltages high enough to create electrical discharges between the electrodes to produce very high temperature, high density plasma pinches in the working gas providing radiation at the spectral line of the active gas. A blast shield positioned just beyond the location of the high density pinch provides a physical barrier which confines the pinch limiting its axial elongation. A small port is provided in the blast shield that permits the radiation but not the plasma to pass through the shield. In a preferred embodiment a surface of the shield facing the plasma is dome-shaped.

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ **BLACK BORDERS**

☒ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☒ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.